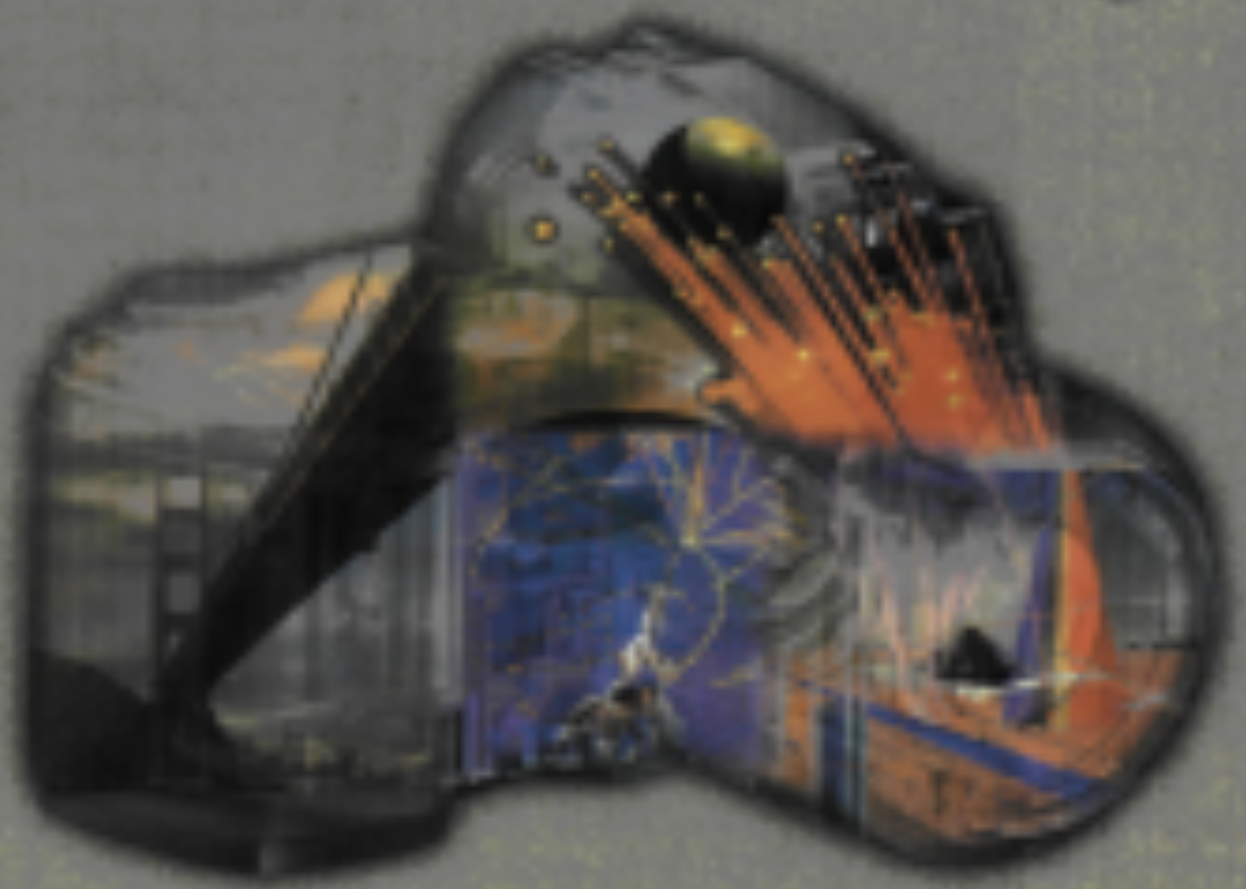
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ

ΦΥΣΙΚΗ

ΓΕΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ

Γ' ΤΑΞΗΣ ΓΕΝΙΚΟΥ ΛΥΚΕΙΟΥ



ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΕΚΔΟΣΕΩΣ ΔΙΔΑΚΤΙΚΩΝ ΒΙΒΛΙΩΝ

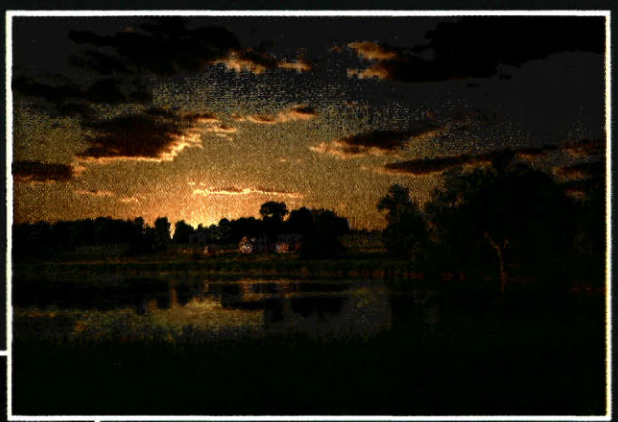
ΑΘΗΝΑ

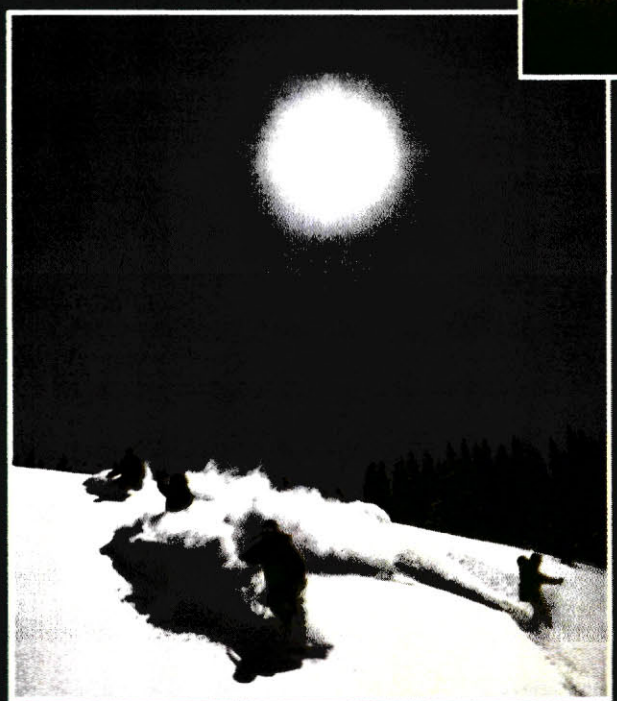
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΤΟ ΦΩΣ

- Η φύση του φωτός
- Η ταχύτητα του φωτός
- Μήκος κύματος και συχνότητα φωτός
- Ανάλυση λευκού φωτός και χρώματα
- Πόλωση του φωτός

Το φως κατά το σούρουπο διανύει μεγάλη απόσταση μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα και ένα σημαντικό μέρος του κυανού χρώματος σκεδάζεται. Το φως που προσπίπτει σε ένα νέφος, όταν ανακλάται από το νέφος και γίνεται τελικά ορατό από τον παρατηρητή, έχει κίτρινη έως ερυθρή απόχρωση.

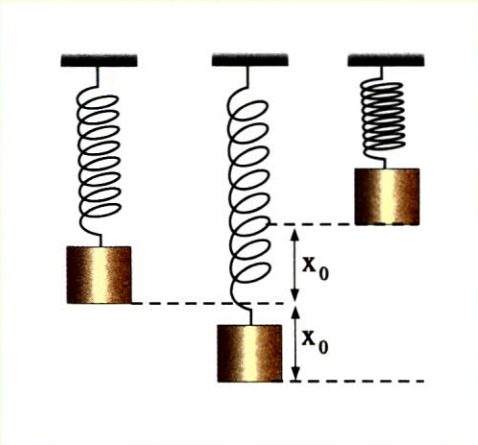




Ένας πολωτής τύπου polaroid, που έχει προσαρτηθεί στο φακό μιας φωτογραφικής μηχανής, επιλέγει τα κύματα με μία συγκεκριμένη διεύθυνση πόλωσης και εμποδίζει όλα τα άλλα κύματα. Έτσι ο φωτογράφος κατάφερε να αποτυπώσει το στιγμιότυπο της διπλανής εικόνας και φωτογράφισε ακόμα και τον Ήλιο.

Εισαγωγικό ένθετο

Ταλάντωση



Το σώμα του διπλανού σχήματος είναι εξαρτημένο από το άκρο του ελατηρίου σταθεράς k. Αν το απομακρύνουμε από τη θέση ισορροπίας του κατά x_0 και ύστερα το αφήσουμε ελεύθερο, θα εκτελέσει μια κίνηση η οποία θα επαναλαμβάνεται σε ίσα χρονικά διαστήματα. Μια τέτοια κίνηση, όπως αυτή του συστήματος ελατηρίου - μάζας, ονομάζεται **απλή αρμονική ταλάντωση**.

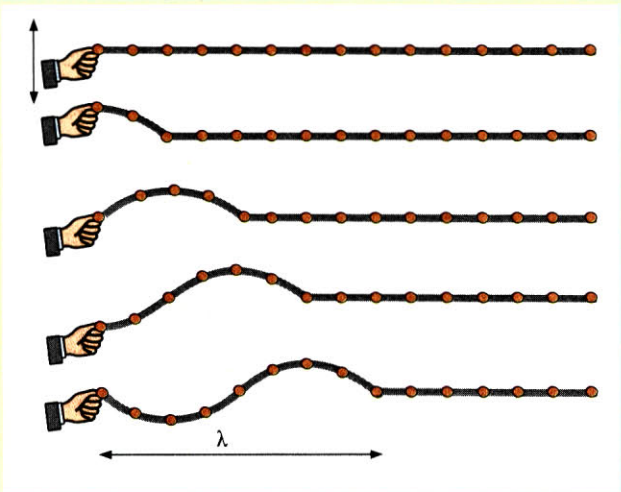
- Η μέγιστη απομάκρυνση x_0 του σώματος από τη θέση ισορροπίας του ονομάζεται **πλάτος** της ταλάντωσης.
- Ο χρόνος που χρειάζεται το σώμα, για να περάσει διαδοχικά δύο φορές από το ίδιο σημείο της τροχιάς του και με την ίδια φορά, ονομάζεται **περίοδος T**. Είναι φανερό ότι σε χρόνο μιας περιόδου το σώμα εκτελεί μια πλήρη ταλάντωση.
- Το πηλίκο του αριθμού των ταλαντώσεων (N), που κάνει το σώμα σε χρόνο t, προς το χρόνο t ονομάζεται **συχνότητα *f***. Δηλαδή:

$$f = N/t \text{ , για } t=T \text{ και } N=1\text{, παίρνουμε: } f = 1/T$$

- Επίσης εδώ πρέπει να τονίσουμε ότι η **ενέργεια** του ταλαντωτή εξαρτάται από το πλάτος της ταλάντωσης και δίνεται από τη σχέση: $E=\frac{1}{2}kx_0^2$

Κύμα

Ονομάζουμε **μηχανικό κύμα** κάθε διαταραχή που διαδίδεται με πεπερασμένη ταχύτητα σε ένα υλικό ελαστικό μέσο. Το ελαστικό υλικό μέσο φανταζόμαστε ότι αποτελείται από στοιχειώδεις δομικές μονάδες που έχουν ελαστική σύζευξη μεταξύ τους, δηλαδή συνδέονται με ελαστικές δυνάμεις. Αν προκαλέσουμε μια διαταραχή σε ένα σημείο του ελαστικού μέσου, αυτή μεταδίδεται στην επόμενη, στη μεθεπόμενη κ.ο.κ. δομική μονάδα με πεπερασμένη ταχύτητα, η οποία ονομάζεται **ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής**.



Στο διπλανό σχήμα το χέρι μας κρατάει το ένα άκρο οριζόντιου σχοινιού και εκτελεί αρμονική ταλάντωση σε κατακόρυφη διεύθυνση με συχνότητα f. Παρατηρούμε ότι αυτή η ταλάντωση διαδίδεται από το χέρι μας σε κάθε δομική μονάδα του σχοινιού προς τα δεξιά. Τέτοια κύματα στα οποία τα μόρια του μέσου ταλαντώνονται σε διεύθυνση κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος ονομάζονται **εγκάρσια κύματα**.

Η συχνότητα ταλάντωσης των μορίων του μέσου είναι ίδια με τη συχνότητα ταλάντωσης του χεριού μας, που στην προκειμένη περίπτωση αποτελεί την πηγή του κύματος. Η συχνότητα αυτή είναι η συχνότητα του κύματος.

- **Ταχύτητα διάδοσης (c)** του κύματος σε κάποιο μέσο ονομάζουμε το πηλίκο της απόστασης x, που διανύει το κύμα (διαταραχή) κατά μήκος μιας διεύθυνσης διάδοσης, σε χρόνο t προς το χρόνο αυτό. Δηλαδή ισχύει:

$$c = x/t \qquad (1)$$

Η ταχύτητα διάδοσης c εξαρτάται από τη φύση του ελαστικού μέσου διάδοσης.

• **Μήκος κύματος (λ)** ονομάζουμε την απόσταση που διατρέχει το κύμα σε χρόνο μιας περιόδου. Αν στην (1) θέσουμε όπου x=λ και t=T, παίρνουμε:

$$c = \lambda / T \text{ και, αν θέσουμε όπου } T = 1/f, \text{ παίρνουμε: } c = \lambda f$$

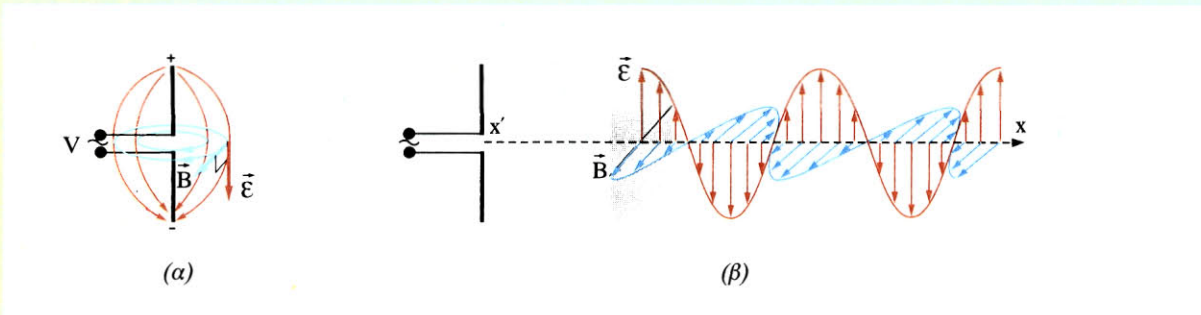
Η σχέση $c = \lambda f$ ισχύει για οποιοδήποτε αρμονικό κύμα και ονομάζεται **θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής**. Τονίζουμε εδώ ότι η συχνότητα f καθορίζεται από την πηγή και ότι με τη συχνότητα αυτή ταλαντώνονται όλα τα σωματίδια του ελαστικού μέσου κατά τη διάδοση του κύματος. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι ένα ορισμένο κύμα, που διαδίδεται σε διαφορετικά ελαστικά μέσα, θα έχει την ίδια συχνότητα σε όλα τα μέσα, αλλά διαφορετικές τιμές μήκους κύματος και ταχύτητας διάδοσής του.

Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Ο ήχος στο ραδιόφωνο και ο ήχος και η εικόνα στην τηλεόραση λαμβάνονται από αυτές τις συσκευές χάρη στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που στέλνονται από τις κεραίες των ραδιοφωνικών και των τηλεοπτικών σταθμών αντίστοιχα.

Όμως τι είναι και πώς παράγονται αυτά τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα;

Ας θεωρήσουμε μια κεραία, δηλαδή ένα συρμάτινο αγωγό, η οποία τροφοδοτείται από εναλλασσόμενη τάση V. Η κεραία διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια μέσα σ' αυτήν εκτελούν αρμονική ταλάντωση. Γύρω από την κεραία δημιουργείται ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό πεδίο, των οποίων οι δυναμικές γραμμές, κάποια χρονική στιγμή, εικονίζονται στο σχήμα (α).



Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλονται ημιτονοειδώς με το χρόνο και αυτή η μεταβολή διαδίδεται, απομακρυνόμενη από την κεραία, κατά μήκος της ευθείας x΄x, που αποτελεί και τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Η διαδιδόμενη αυτή διαταραχή ονομάζεται **ηλεκτρομαγνητικό κύμα**.

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα δε χρειάζεται κάποιο ελαστικό μέσο για να διαδοθεί. Διαδίδεται ακόμα και στο κενό με ταχύτητα c_0, γνωστή ως ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο κενό. Σε κάθε θέση της ευθείας x΄x οι εντάσεις του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι κάθετες μεταξύ τους, καθώς επίσης και προς τη διεύθυνση διάδοσης (σχήμα β). Γι' αυτό λέμε ότι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι εγκάρσιο κύμα.

Όπως στο μηχανικό κύμα τα μόρια του μέσου εκτελούν αρμονικές ταλαντώσεις, έτσι και στο ηλεκτρομαγνητικό κύμα η ένταση Ε του ηλεκτρικού και η ένταση Β του μαγνητικού πεδίου, σε κάθε σημείο, ταλαντώνονται αρμονικά.

Τι είναι το φως, σωματίδιο ή κύμα;

1.1 Η ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Από πολύ παλιά, στους αρχαιότατους χρόνους, φιλόσοφοι και φυσιοδίφες προσπαθούσαν να κατανοήσουν και να ερμηνεύσουν τη «φύση» του φωτός. Για πολλά χρόνια ήταν αντικείμενο μακρόπνοων συζητήσεων, διαφωνιών, επιχειρημάτων και αντεπιχειρημάτων.

Το φως ήταν και είναι μια βασική αιτία της ύπαρξης ζωής στον πλανήτη μας. Ας μην ξεχνάμε ότι τα φυτά, με τη φωτοσύνθεση, μετατρέπουν την ενέργεια που παρέχει το φως του Ήλιου σε χημική ενέργεια, την οποία χρησιμοποιούν στη συνέχεια για την ανάπτυξή τους. Το φως είναι αυτό που κάνει ορατά τα αντικείμενα που βρίσκονται στον πλανήτη μας, τη Γη, και στο Σύμπαν. Με τη βοήθεια του φωτός «επικοινωνούμε» με τα άστρα και τους πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος αντλώντας χιλιάδες πληροφορίες για τη σύστασή τους (φασματοσκοπική μέθοδος).

Πρώτοι οι αρχαίοι Έλληνες είχαν αντιληφθεί και διατυπώσει αυτό που εμείς σήμερα ονομάζουμε «σωματιδιακή φύση» του φωτός. Πίστευαν δηλαδή ότι το φως που εκπέμπει ο Ήλιος, αλλά και κάθε φωτοβολούσα πηγή, αποτελείται από μικρά σωματίδια τα οποία κινούνται με πολύ μεγάλη ταχύτητα και, όταν πέφτουν στο μάτι του παρατηρητή, διεγείρουν το αισθητήριο όργανο της όρασης.

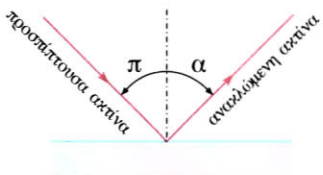
Σ' αυτή ακριβώς τη σκέψη, δηλαδή τη σωματιδιακή φύση του φωτός, στηρίχτηκε, πολύ μεταγενέστερα, ο Newton (Νεύτωνας), για να διατυπώσει, με βάση τις αρχές της διατήρησης της ενέργειας και της ορμής, το νόμο της ανάκλασης του φωτός, δηλαδή:

γωνία πρόσπτωσης (π) = γωνία ανάκλασης (α)

Δύο σημαντικά φαινόμενα, η περίθλαση και η συμβολή του φωτός, απασχόλησαν τους φυσικούς Christian Huygens (Κρίστιαν Χόυχενς, 1629-1695) και Tomas Young (Τόμας Γιανγκ, 1773-1829)

Ο Αριστοτέλης αναφέρει: Ο Εμπεδοκλής ... έλεγε ότι το φως, όντας κάτι το σωματιδιακό, που απορρέει από το φωτίζον σώμα, φθάνει πρώτα στο μεταξύ της Γης και του ουρανού χώρο και ύστερα σε μας. Μας διαφεύγει όμως η κίνησή του αυτή λόγω της ταχύτητάς του.

Isaac Newton



James Clerk Maxwell

Το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

το 1670 και 1803 αντίστοιχα. Οι Huygens και Young, μέσα από πειραματικές διαδικασίες πάνω στα φαινόμενα αυτά, απέδειξαν ότι το φως έχει κυματική φύση και συγκεκριμένα ότι είναι εγκάρσια κύματα.

Το αποκορύφωμα της έρευνας για τη φύση του φωτός ήρθε το 1865, όταν ο Maxwell (Μάξγουελ), αναπτύσσοντας τη μεγαλειώδη θεωρία του, απέδειξε ότι το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Συνεχίζοντας την ιστορική αναδρομή συναντάμε στις αρχές του 20ού αιώνα το Max Planck (Μαξ Πλανκ, 1858-1947), ο οποίος χρησιμοποίησε τη σωματιδιακή φύση του φωτός, για να ερμηνεύσει την ακτινοβολία που εκπέμπουν τα θερμά σώματα.

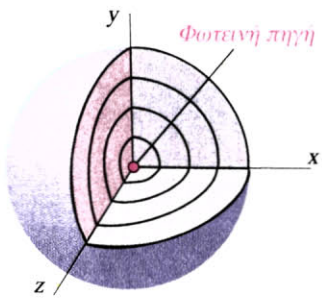
Στην πιο σύγχρονη εποχή ο Einstein (Αϊνστάιν) χρησιμοποιώντας τη σωματιδιακή φύση του φωτός ερμηνεύει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (*εκπομπή ηλεκτρονίων από μέταλλα, όταν πάνω σ' αυτά προσπίπτει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία*).

Σήμερα πιστεύουμε στη διπλή φύση του φωτός, δηλαδή ότι το φως συμπεριφέρεται ως κύμα και ως σωματίδιο που ονομάζεται φωτόνιο. Σε φαινόμενα όπως η συμβολή, η περίθλαση και η πόλωση εκδηλώνεται η κυματική φύση του φωτός (ηλεκτρομαγνητικό κύμα), ενώ σε φαινόμενα που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση του φωτός με την ύλη (απορρόφηση - εκπομπή), όπως το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, εκδηλώνεται η σωματιδιακή φύση του φωτός.

Η ερώτηση λοιπόν «τι είναι το φως, σωματίδιο ή κύμα;» είναι εσφαλμένη, γιατί **το φως συμπεριφέρεται ως κύμα και ως σωματίδιο**.

Η κυματική φύση του φωτός. Ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell

Η πιο σημαντική εξέλιξη του 19ου αιώνα στη μελέτη παραγωγής και διάδοσης του φωτός υπήρξε το έργο του Maxwell, ο οποίος το 1873 διατύπωσε τη θεωρία της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, **το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία ξεκινούν από τη φωτεινή πηγή και διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις**.



1-1 *Σφαιρικά μέτωπα κύματος διαδίδονται ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις ξεκινώντας από μία πηγή φωτός.*

Ο Maxwell απέδειξε ότι, όταν ένα ηλεκτρικό φορτίο ταλαντώνεται, παράγει ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα αποτελείται από ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό κύμα. Δηλαδή είναι ένα πεδίο με δύο χαρακτηριστικά, την ένταση Ε του ηλεκτρικού πεδίου και την ένταση Β του μαγνητικού πεδίου, των οποίων τα διανύσματα είναι κάθετα μεταξύ τους και μεταβάλλονται από θέση σε θέση και από στιγμή σε στιγμή. Γι' αυτό το λόγο χαρακτηρίζονται ως *δύο τοπικά και χρονικά μεταβαλλόμενα μεγέθη* (*Ε* και *Β*). Οι εντάσεις των πεδίων Ε και Β παίρνουν ταυτόχρονα τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή, δηλαδή έχουν την ίδια φάση και διαδίδονται με την ίδια ταχύτητα c (σχήμα 1-2).

Οι συνηθισμένες πηγές ορατού φωτός δίνουν τέτοιες συχνότητες (ή μήκη κύματος) ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, ώστε να γίνονται αντιληπτά από το μάτι. Το μήκος κύματος των κυμάτων αυτών κυμαίνεται από 400nm έως και 700nm περίπου.

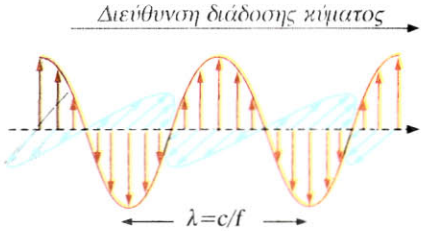
Επίσης εύκολα διαπιστώνουμε ότι το φως μεταφέρει ενέργεια (π.χ. ένα οποιοδήποτε σώμα, όταν εκτεθεί σε ηλιακή ακτινοβολία,

θερμαίνεται). Η ενέργεια αυτή είναι ενέργεια ηλεκτρικού και ενέργεια μαγνητικού πεδίου, η οποία παράγεται από τις πηγές και μεταφέρεται ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

Την ορθότητα της θεωρίας του Maxwell απέδειξε πειραματικά ο Hertz (Χερτς) το 1887, ο οποίος παρήγαγε, μέσω ταχέων ηλεκτρικών ταλαντώσεων, κύματα της ίδιας φύσης με αυτήν του φωτός αλλά με μικρότερη συχνότητα.

Η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος (c), η συχνότητα (f) και το μήκος κύματος (λ) συνδέονται με τη σχέση $c = \lambda f$, η οποία ονομάζεται θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής.

$$c = \lambda \cdot f \qquad \text{Θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής} \qquad (1.1)$$



1-2 Στιγμιότυπο ηλεκτρομαγνητικού κύματος μακριά από την πηγή, που διαδίδεται οριζόντια. Οι εντάσεις Ε και Β των πεδίων είναι κάθετες στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος και γι' αυτό τα κύματα αυτά ονομάζονται εγκάρσια.

Η σωματιδιακή φύση του φωτός. Θεωρία των κβάντα

Παρ' όλο που η κλασική θεωρία (αυτή που αναπτύχθηκε πριν από το 1922) του ηλεκτρομαγνητισμού ερμήνευσε ορισμένα φαινόμενα του φωτός, όπως η συμβολή, η περίθλαση, η πόλωση κ.ά., δεν κατόρθωσε να ερμηνεύσει κάποια άλλα φαινόμενα που σχετίζονται με την **αλληλεπίδραση της φωτεινής ακτινοβολίας με την ύλη**.

Πολλά πειραματικά δεδομένα δεν μπορούσαν να ερμηνευτούν με την παραδοχή ότι το φως είναι μόνο κύμα. Το πιο σημαντικό από τα πειράματα αυτά ήταν εκείνο της μελέτης του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Για την ερμηνεία της εκπομπής και της απορρόφησης του φωτός δεν αρκούσαν μόνο κάποιες επεκτάσεις της κλασικής θεωρίας. Στην πραγματικότητα χρειάστηκε κάτι πιο ριζικό από μια απλή επέκταση.

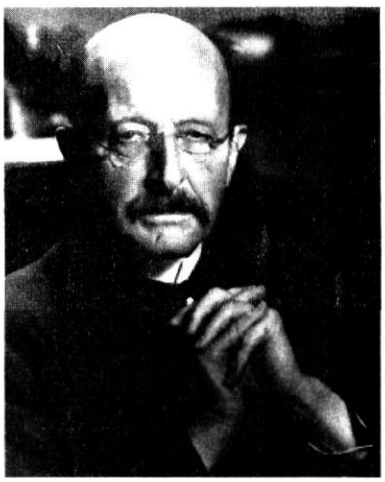
Το 1900 ο Planck, για να ερμηνεύσει την ακτινοβολία που παράγει ένα θερμαινόμενο σώμα, εισήγαγε τη θεωρία των *κβάντα φωτός*, την οποία εφάρμοσε αργότερα ο Einstein, για να ερμηνεύσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Σύμφωνα με την **κβαντική θεωρία του Planck**, το φως (και γενικότερα κάθε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) εκπέμπεται και απορροφάται από τα άτομα της ύλης όχι κατά συνεχή τρόπο αλλά **ασυνεχώς**. Δηλαδή κάθε άτομο εκπέμπει ή απορροφά στοιχειώδη ποσά ενέργειας, που ονομάζονται **κβάντα φωτός** ή **φωτόνια**. Από το άτομο λοιπόν δεν εκπέμπονται συνεχώς κύματα αλλά φωτόνια, καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη συχνότητα και έχει συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας **E**.

Όταν το φως προσπίπτει πάνω στην ύλη, τα άτομα της ύλης απορροφούν την ακτινοβολία ασυνεχώς, που σημαίνει ότι κάθε άτομο απορροφά μεμονωμένα φωτόνια. Κάθε φωτόνιο μιας ακτινοβολίας έχει ενέργεια που δίνεται από τη σχέση $E = hf$.

$$E = h \cdot f \qquad \text{Ενέργεια φωτονίου} \qquad (1.2)$$

Το h είναι μια σταθερά, που ονομάζεται *σταθερά του Planck*, και έχει τιμή $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s$ και f η συχνότητα.



Max Planck (1858-1947).
*Μία δέσμη φωτός αποτελείται από μικρά πακέτα ενέργειας, που ονομάζονται **κβάντα φωτός** ή **φωτόνια**.*

Με τον όρο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο περιγράφουμε την εκπομπή ηλεκτρονίων από την επιφάνεια των μετάλλων, όταν προσπίπτει πάνω τους κατάλληλη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ορατή ή υπεριώδης, κτλ.

*Ο όρος κβάντα προέρχεται από τη λατινική λέξη **quantum=ποσό***

*Όταν μια ποσότητα είναι κβαντωμένη, σημαίνει ότι παίρνει μόνο διακριτές (ορισμένες) τιμές, δηλαδή το σύνολο τιμών δεν είναι συνεχές. Ας θυμηθούμε το ηλεκτρικό φορτίο. Αυτό είναι κβαντωμένο, διότι δεν παίρνει οποιεσδήποτε τιμές, αλλά μόνο ακέραια πολλαπλάσια της τιμής του φορτίου ηλεκτρονίου: **$1{,}6 \times 10^{-19}$ C**.*

Όταν προσπίπτει φως πάνω στα μέταλλα, τότε μεταφέρεται ενέργεια από ένα φωτόνιο σε ένα από τα ηλεκτρόνια του ατόμου του μετάλλου. Δηλαδή το ηλεκτρόνιο αλληλεπιδρά με ένα από τα φωτόνια του φωτός σαν να είναι το φωτόνιο σωματίδιο.

Η θεωρία των κβάντα δεν αναιρεί την κυματική φύση του φωτός. Το φωτόνιο έχει και κυματικές ιδιότητες, για παράδειγμα η ενέργειά του εξαρτάται από τη συχνότητά του, που είναι κατ' εξοχήν κυματική ιδιότητα.

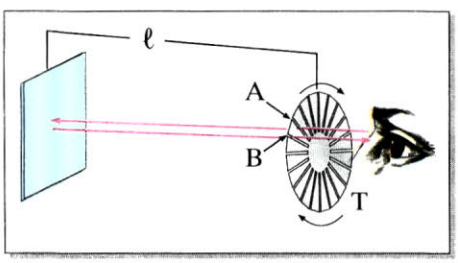
1.2 Η ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

*Επειδή το φως διαδίδεται στο κενό και στον αέρα με πολύ μεγάλη ταχύτητα, περίπου **$3x10^8$m/s**, οι πρώτες προσπάθειες για τη μέτρησή της απέτυχαν. Ο Γαλιλαίος ήταν από τους πρώτους που προσπάθησε να μετρήσει την ταχύτητα του φωτός χρησιμοποιώντας απλά μέσα για την εποχή εκείνη. Έτσι τοποθέτησε δύο παρατηρητές πάνω σε δύο πύργους των τειχών της Πίζας, οι οποίοι απείχαν μεταξύ τους 5 μίλια. Κάθε παρατηρητής κρατούσε από ένα φανάρι που ήταν κλειστό και, όποτε χρειαζόταν, άνοιγε το παραθυράκι. Όταν ο πρώτος άνοιγε το παραθυράκι του φαναριού του, ο δεύτερος ήταν συνεννοημένος να ανοίξει το δικό του αμέσως μόλις έβλεπε το φως του πρώτου.*

Αν λοιπόν μετρούσε κανείς το χρόνο που περνούσε από τη στιγμή που ο πρώτος άνοιγε το παραθυράκι έως τη στιγμή που έβλεπε το φως του δεύτερου παρατηρητή (και με γνωστή τη μεταξύ τους απόσταση), με μια απλή διαίρεση θα μπορούσε να μετρήσει την ταχύτητα του φωτός. Όμως ο χρόνος αντίδρασης των δύο παρατηρητών ήταν πολύ μεγαλύτερος από το χρόνο που χρειαζόταν το φως για να διανύσει τη μεταξύ τους απόσταση και έτσι η μέθοδος αυτή δεν ήταν εφαρμόσιμη και οδήγησε σε αποτυχία. Έδειξε όμως ότι η ταχύτητα του φωτός είναι τόσο μεγάλη, ώστε είναι αδύνατο να μετρηθεί με τέτοια χονδροειδή μηχανικά μέσα.

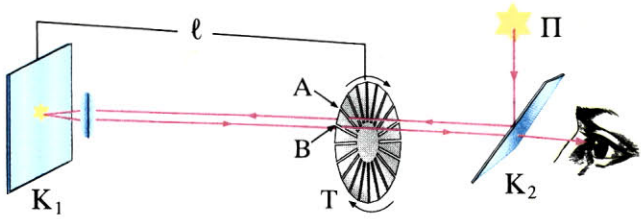
Οι πρώτες επιτυχείς μέθοδοι για τη μέτρηση της ταχύτητας του φωτός ήταν βασισμένες σε αστρονομικές παρατηρήσεις. Πρώτος μέτρησε χονδρικά την ταχύτητα του φωτός ο Δανός αστρονόμος Ole Roemer (Όλε Ρέμερ, 1644-1710). Ο Roemer υπολόγισε ότι η τιμή της ταχύτητας του φωτός είναι περίπου $2x10^8$m/s. Η μέτρηση αυτή έχει ιστορική αξία, διότι, εκτός του ότι προσέγγιζε αρκετά την πραγματική τιμή της ταχύτητας, έδειξε για πρώτη φορά ότι η ταχύτητα του φωτός έχει πεπερασμένη τιμή.

Η μέθοδος του Fizeau



Το 1849 ο H.L. Fizeau (Φιζό), ένας Γάλλος φυσικός, κατάφερε να μετρήσει την ταχύτητα του φωτός με απλά μηχανικά μέσα. Στο διπλανό σχήμα παριστάνεται μια απλουστευμένη μορφή της διάταξης που χρησιμοποίησε. Η βασική ιδέα της μεθόδου ήταν να μετρηθεί ο χρόνος που χρειάζεται το φως, για να διανύσει την απόσταση «πήγαινε - έλα» μεταξύ μιας φωτεινής πηγής Π και ενός κατόπτρου K_1, που βρισκόταν σε μεγάλη απόσταση από την πηγή (σχήμα 1-3).

Η ακτίνα που προέρχεται από τη φωτεινή πηγή Π ανακλάται στο «ημιεπαργυρωμένο κάτοπτρο» K_2 και, αφού διανύσει την απόσταση ℓ, προσπίπτει στο κάτοπτρο K_1. Η ανακλώμενη ακτίνα επιστρέφει από την ίδια διαδρομή, μεταφέροντας το είδωλο της πηγής Π, οπότε γίνεται αντιληπτή από κάποιο παρατηρητή που βρίσκεται πίσω από το K_2. Μεταξύ του παρατηρητή και του κατόπτρου K_1 παρεμβάλλεται οδοντωτός τροχός Τ, ο οποίος περιστρέφεται με τέτοιο τρόπο, ώστε άλλοτε η ακτίνα φωτός να διακόπτεται και άλλοτε όχι. Όταν ο τροχός περιστρέφεται αργά, ο παρατηρητής θα βλέπει φως και σκοτάδι. Αυξάνοντας διαρκώς την ταχύτητα του τροχού θα έλθει η στιγμή που ο παρατηρητής δε θα βλέπει φως.



1-3 Στο πείραμα Fizeau, που εικονίζεται δίπλα, η απόσταση ℓ μεταξύ του οδοντωτού τροχού T και του κατόπτρου K_1 ήταν περίπου 8630m ή 5,36miles. Απλοποιήσαμε τη διάταξη παραλείποντας τη σειρά των φακών και κατόπτρων που χρησιμοποίησε ο Fizeau.

Αυτό θα συμβεί, όταν το φως, που θα διέλθει από το διάκενο A του τροχού, αφού ανακλαστεί στο κάτοπτρο K_1, συναντήσει το επόμενο δόντι του τροχού.

Αν αυξήσουμε ακόμα περισσότερο την ταχύτητα του τροχού, το φως θα γίνει πάλι ορατό, γιατί θα διέλθει από το επόμενο διάκενο B. Ας υποθέσουμε τώρα ότι ο τροχός έχει N δόντια και περιστρέφεται με συχνότητα f (στροφές ανά δευτερόλεπτο). Τότε ο χρόνος t, για να περιστραφεί ο τροχός κατά ένα δόντι, είναι:

$$t=\frac{\text{χρόνος μιας περιστροφής}}{\text{αριθμός δοντιών}}=\frac{T}{N}=\frac{\frac{1}{f}}{N}=\frac{1}{f\cdot N} \qquad (1)$$

Στο χρόνο αυτό το φως έχει διανύσει την απόσταση 2ℓ «πήγαινε - έλα». Άρα η ταχύτητα του φωτός θα είναι:

$$c=\frac{\text{απόσταση}}{\text{χρόνος}}=\frac{2\ell}{t} \text{ και λόγω της (1)} \quad c=2\ell\cdot f\cdot N \qquad (1.3)$$

Με γνωστά τα μεγέθη ℓ, f, N υπολογίζουμε την ταχύτητα c.

Ο Fizeau γνώριζε την απόσταση ℓ, τον αριθμό των δοντιών του τροχού και τη συχνότητα περιστροφής και έτσι υπολόγισε ότι το μέτρο της ταχύτητας του φωτός είναι $3{,}1\text{x}10^8$m/s. Ακριβέστερα πειράματα, που έγιναν αργότερα, έδωσαν την τιμή **$2{,}9979\text{x}10^8$m/s**.

Το τέχνασμα της «διακοπτόμενης δέσμης», τροποποιούμενο κατάλληλα, χρησιμοποιείται σήμερα για τη μέτρηση της ταχύτητας των νετρονίων και άλλων σωματιδίων.

Για την ταχύτητα του φωτός γνωρίζουμε σήμερα ότι:

- Το φως, όπως και κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα, διαδίδεται στο κενό με σταθερή ταχύτητα περίπου $3\text{x}10^8$m/s.
- Η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι μια θεμελιώδης σταθερά της φύσης.
- Η ταχύτητα του φωτός έχει την ίδια τιμή σε όλα τα συστήματα αναφοράς και είναι ανεξάρτητη από την κίνηση της φωτεινής πηγής (αξίωμα του Einstein).

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1 - 1

Υποθέτουμε ότι ο οδοντωτός τροχός του πειράματος Fizeau έχει 360 δόντια. Αυξάνοντας διαρκώς (έχουμε αρχίσει από το μηδέν) τη συχνότητα περιστροφής του τροχού, ο παρατηρητής βλέπει συνεχώς, για κάποια τιμή συχνότητας, το είδωλο της φωτεινής πηγής. Υπολογίστε τη συχνότητα και την περίοδο περιστροφής του τροχού.

ΛΥΣΗ Χρησιμοποιώντας τη σχέση 1.3 υπολογίζουμε πρώτα τη συχνότητα περιστροφής. Έχουμε:

$$c=2\ell\cdot f\cdot N, \text{ οπότε } f=\frac{c}{2\ell\cdot N}=\frac{3\cdot 10^8\text{m/s}}{2\cdot 8630\text{m}\cdot 360} \text{ ή}$$

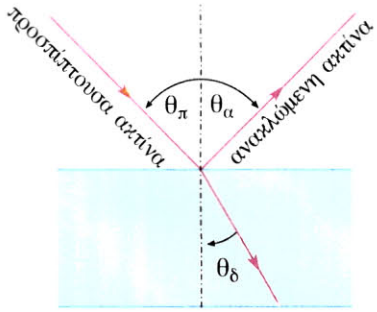
f=48,28Hz.

Η περίοδος δίνεται από τη σχέση $T=1/f$.

Άρα: $T=\frac{1}{48{,}28}\text{s}=0{,}0207\text{ s}$

1.3 ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ

Ανάκλαση και διάθλαση του φωτός

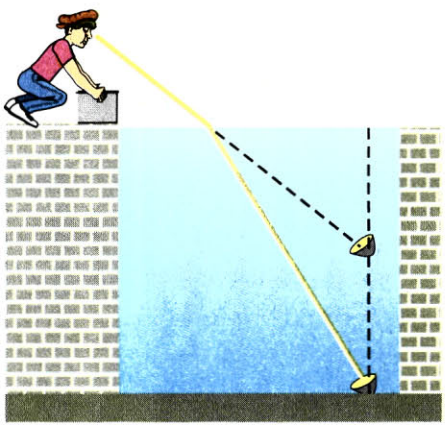


1-4α *Ανάκλαση και διάθλαση από οπτικά αραιότερο σε οπτικά πυκνότερο μέσο. θ_π είναι η γωνία πρόσπτωσης, θ_δ η γωνία διάθλασης και θ_α η γωνία ανάκλασης. Ισχύει: $\theta_\delta<\theta_\pi$.*

Όταν μία φωτεινή δέσμη, που διαδίδεται σε ένα μέσο, συναντήσει τη διαχωριστική επιφάνεια που χωρίζει το αρχικό μέσο διάδοσης από ένα άλλο οπτικό μέσο, τότε ένα μέρος της ανακλάται προς το αρχικό μέσο διάδοσης, ενώ ένα άλλο μέρος συνεχίζει να διαδίδεται στο δεύτερο μέσο. Στο σχήμα 1-4α βλέπουμε πώς ανακλώνται οι ακτίνες, όταν προσπίπτουν σε μια λεία επιφάνεια, για παράδειγμα από τον αέρα στην επιφάνεια ενός γυαλιού. Η προσπίπτουσα και η ανακλώμενη ακτίνα σχηματίζουν, στο σημείο ανάκλασης, γωνίες θ_π και θ_α, αντίστοιχα, με την κάθετο προς την ανακλώσα επιφάνεια. Πειραματικά αποδεικνύεται ότι $\theta_\pi=\theta_\alpha$.

Οι ακτίνες που εισέρχονται στο γυαλί αλλάζουν διεύθυνση διάδοσης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διάθλαση. Όταν οι ακτίνες εισέρχονται από τον αέρα στο γυαλί, τότε οι διαθλώμενες ακτίνες πλησιάζουν την κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια (σχήμα 1-4α), ενώ, όταν εισέρχονται από το γυαλί στον αέρα, απομακρύνονται από την κάθετο.

Στο πείραμα του σχήματος 1-4β βλέπουμε ότι οι ακτίνες φωτός που εκπέμπονται από μία φωτεινή πηγή η οποία βρίσκεται στον πυθμένα της πισίνας, όταν εξέρχονται από το νερό στον αέρα, εκτρέπονται από την πορεία τους και μας κάνουν να βλέπουμε τη φωτεινή πηγή πιο ψηλά από ό,τι πραγματικά βρίσκεται.



1-4β *Το φως, κατά τη διάδοσή του σε δύο διαφορετικά οπτικά μέσα, αλλάζει διεύθυνση διάδοσης. Έτσι αντικείμενα ορατά στο μάτι φαίνονται τελικά ότι προέρχονται από διαφορετική θέση. Το φαινόμενο οφείλεται στη διάθλαση του φωτός.*

Ταχύτητα και μήκος κύματος του φωτός μέσα στην ύλη

Ο λόγος για τον οποίο το φως διαθλάται, καθώς διέρχεται από το ένα υλικό μέσο στο άλλο, είναι ότι η ταχύτητά του έχει διαφορετικές τιμές στα δύο μέσα.

Το φως διαδίδεται στο κενό με ταχύτητα $c_0=3\text{x}10^8$m/s. Μέσα όμως σε κάποιο υλικό η ταχύτητα του φωτός είναι πάντα μικρότερη από τη c_0. Για διευκόλυνσή μας ορίζουμε ένα συντελεστή που ισούται με το πηλίκο της ταχύτητας c_0 του φωτός στο κενό προς την ταχύτητα c μέσα σε κάποιο υλικό και ονομάζεται **δείκτης διάθλασης** n του υλικού μέσου. Ισχύει δηλαδή:

$$n=\frac{\text{ταχύτητα του φωτός στο κενό}}{\text{ταχύτητα του φωτός στο μέσο}}=\frac{c_0}{c} \qquad (1.4)$$

Επειδή η ταχύτητα του φωτός μέσα σε ένα υλικό είναι πάντα μικρότερη από την ταχύτητά του στο κενό, από τον ορισμό προκύπτει ότι ο δείκτης διάθλασης για οποιοδήποτε υλικό είναι πάντα μεγαλύτερος από τη μονάδα, ενώ για το κενό ισχύει n=1.

Όταν το φως διαπερνά μία διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων (π.χ. από τον αέρα στο γυαλί), η συχνότητα *f* παραμένει αμετάβλητη. Τούτο γίνεται σαφές, αν σκεφτούμε το εξής: το φως είναι κύμα, άρα ο αριθμός των μηκών κύματος που προσπίπτουν στη διαχωριστική επιφάνεια, ανά μονάδα χρόνου, είναι ίσος με τον αριθμό των μηκών κύματος που διέρχονται από αυτήν ανά μονάδα χρόνου. Αν δε συνέβαινε αυτό, η διαχωριστική επιφάνεια έπρεπε να δημιουργεί νέα κύματα ή να εξαφανίζει τα ήδη υπάρχοντα. Δεν έχει

παρατηρηθεί όμως τέτοιος μηχανισμός, που σημαίνει ότι η συχνότητα παραμένει σταθερή, καθώς το φως διέρχεται από τη διαχωριστική επιφάνεια.

Εφαρμόζοντας τη θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής έχουμε διαδοχικά: $c_0 = \lambda_0 \cdot f$ για το κενό και $c = \lambda \cdot f$ για οπτικό μέσο διαφορετικό του κενού. Διαιρώντας τις δύο σχέσεις κατά μέλη προκύπτει: $\frac{c_0}{c} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$ και, λόγω της 1.4, είναι: $n = \frac{\lambda_0}{\lambda}$. Τελικά ισχύει:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \qquad (1.5)$$

Η τελευταία σχέση μάς πληροφορεί ότι φως με μήκος κύματος λ_0 στο κενό υφίσταται μεταβολή του μήκους κύματός του, όταν εισέρχεται σε ένα μέσο με δείκτη διάθλασης n.

Ας δούμε τι συμβαίνει, όταν το φως διαδίδεται σε δύο διαφορετικά υλικά με δείκτες διάθλασης n_1 και n_2, αντίστοιχα, με $n_2 > n_1$. Εφαρμόζοντας την 1.5 για τα δύο οπτικά μέσα, έχουμε:

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_0}{n_1} \quad (1) \quad \text{και} \quad \lambda_2 = \frac{\lambda_0}{n_2} \quad (2)$$

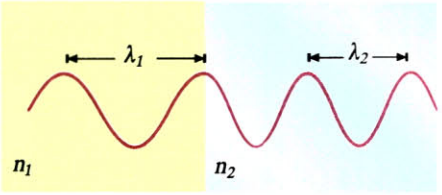
Διαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις (1) και (2) έχουμε:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1} \text{ και, επειδή } n_2 > n_1, \text{ προκύπτει } \lambda_1 > \lambda_2$$

Η τελευταία ανισότητα μας πληροφορεί ότι το μήκος κύματος στο οπτικά πυκνότερο μέσο, δηλαδή στο μέσο που έχει μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης, έχει μικρότερη τιμή από αυτή στο οπτικά αραιότερο.

Επειδή για το κενό είναι εξ ορισμού n=1, γίνεται κατανοητό ότι το μήκος κύματος θα έχει τη μεγαλύτερη τιμή λ_0 στο κενό. Ως μονάδα μέτρησης του μήκους κύματος για το ορατό φως χρησιμοποιείται υποπολλαπλάσιο του 1m, το 1νανόμετρο ($1nm = 10^{-9}m$).

Συμπερασματικά λοιπόν μπορούμε να πούμε ότι: όταν το φως διαδίδεται σε ένα οπτικό μέσο, διατηρεί αμετάβλητα την ταχύτητα (c), το μήκος κύματος (λ) και τη συχνότητα (*f*), ενώ, όταν αλλάζει οπτικό μέσο, τότε αλλάζουν τα μεγέθη c και λ, αλλά διατηρείται σταθερό το *f*, που είναι και η συχνότητα της πηγής που παράγει το φως.



1-4γ *Εικόνα που δείχνει τη μείωση του μήκους κύματος, όταν το φως διέρχεται από οπτικά αραιότερο σε οπτικά πυκνότερο μέσο. Ισχύει στην περίπτωση αυτή $n_2 > n_1$ και $\lambda_2 < \lambda_1$.*
Το οπτικά πυκνότερο μέσο είναι αυτό που έχει το μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης.

Πίνακας 1.1. Δείκτες διάθλασης διάφορων υλικών που έχουν υπολογιστεί με φως μήκους κύματος λ_0=589nm (κίτρινο χρώμα του νατρίου στο κενό)

Υλικό	Δείκτης διάθλασης
Αέρια (0°C, 1Atm)	
Αέρας	1,000293
Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)	1,00045
Στερεά	
Πάγος (H_2O)	1,309
Ορυκτό άλας (NaCl)	1,544
Χαλαζίας (SiO_2)	1,544
Φθορίτης (CaF_2)	1,434
Ορυκτό ζιρκόνιο ($ZrO_2 . SiO_2$)	1,923
Αδάμας (C)	2,417
Ύαλοι (τυπικές τιμές)	1,5 - 1,9
Υγρά σε θερμοκρασία 20°C	
Μεθανόλη (CH_3OH)	1,329
Νερό (H_2O)	1,333
Αιθανόλη (C_2H_5OH)	1,360
Τετραχλωράνθρακας (CCl_4)	1,460
Γλυκερίνη	1,473
Βενζόλιο	1,501

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1 - 2

Υπολογισμός του δείκτη διάθλασης στο εσωτερικό του ανθρώπινου ματιού: Φωτεινή ακτίνα μήκους κύματος λ_0=589nm, που παράγεται από λυχνία νατρίου, προσπίπτει από τον αέρα σε ανθρώπινο μάτι. Στο υδατοειδές υγρό μέσα στο βολβό του ματιού το μήκος κύματος έχει τιμή λ=439nm. Να υπολογίσετε το δείκτη διάθλασης του υδατοειδούς υγρού, καθώς και την ταχύτητα και τη συχνότητα της φωτεινής ακτίνας στο υγρό αυτό.

ΛΥΣΗ Χρησιμοποιούμε τη σχέση 1.5. Με το σκεπτικό ότι ο δείκτης διάθλασης του αέρα είναι περίπου ένα, τα μήκη κύματος στον αέρα και στο κενό έχουν την ίδια τιμή λ_0. Άρα:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \Rightarrow n = \frac{\lambda_0}{\lambda} \Rightarrow n = \frac{589\,nm}{439\,nm} \Rightarrow n = 1{,}34$$

Βλέποντας τον πίνακα 1.1 διαπιστώνουμε ότι ο δείκτης διάθλασης n έχει περίπου την ίδια τιμή με το νερό.

Ας βρούμε την ταχύτητα τώρα. Ισχύει: $n = \frac{c_0}{c} \Rightarrow$

$$c = \frac{c_0}{n} \Rightarrow c = \frac{3 \cdot 10^8\,m/s}{1{,}34} \Rightarrow c = 2{,}24 \cdot 10^8\,m/s$$

Τέλος, από τη σχέση $c = \lambda f$, έχουμε διαδοχικά:

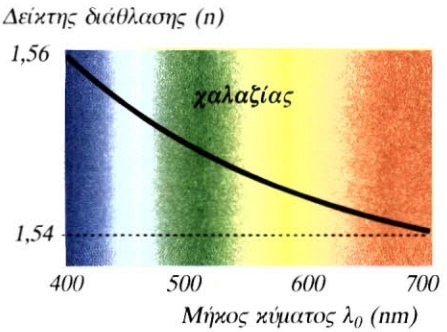
$$c = \lambda \cdot f \Rightarrow f = \frac{c}{\lambda} = \frac{2{,}24 \cdot 10^8\,m/s}{439\,nm} \Rightarrow f = 5{,}1 \cdot 10^{14}\,Hz$$

1.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΥΚΟΥ ΦΩΤΟΣ ΚΑΙ ΧΡΩΜΑΤΑ

Διασκεδασμός και πρίσματα

Στην προηγούμενη υποενότητα είδαμε ότι η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι ίδια για όλα τα μήκη κύματος. Σε ένα υλικό οπτικό μέσο η ταχύτητα του φωτός είναι διαφορετική για διαφορετικά μήκη κύματος. Ο δείκτης διάθλασης του μέσου δεν είναι σταθερός, αλλά εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτός.

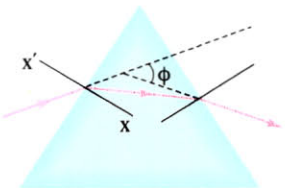
Το φαινόμενο αυτό, δηλαδή η **εξάρτηση της ταχύτητας του φωτός και του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος, ονομάζεται διασκεδασμός**. Στο σχήμα 1-5 απεικονίζεται η εξάρτηση του δείκτη διάθλασης ενός οπτικού υλικού (χαλαζία) από το μήκος κύματος λ_0 στο κενό. Η τιμή του n, όπως βλέπουμε, μειώνεται, καθώς αυξάνεται η τιμή του μήκους κύματος. Φως μεγαλύτερου μήκους κύματος έχει μεγαλύτερη ταχύτητα σε ένα μέσο από φως μικρότερου μήκους κύματος.



1-5 *Εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος.*

Ανάλυση του λευκού φωτός

Για να κατανοήσουμε το φαινόμενο ανάλυσης του λευκού φωτός, ας δούμε αρχικά πώς προκαλείται η εκτροπή (αλλαγή κατεύθυνσης) μιας μονοχρωματικής ακτίνας φωτός από ένα πρίσμα. Στο σχήμα 1-6 έχουμε μία τέτοια ακτίνα φωτός, που προσπίπτει πλάγια στην αριστερή επιφάνεια ενός πρίσματος. Επειδή ο δείκτης διάθλασης του πρίσματος είναι μεγαλύτερος από το δείκτη διάθλασης του οπτικού μέσου που τον περιβάλλει, η ακτίνα διαθλάται προσεγγίζοντας την κάθετη xx΄, ενώ, όταν η ακτίνα εξέρχεται από το πρίσμα, απομακρύνεται από την κάθετη. Βλέπουμε ότι η εξερχόμενη ακτίνα έχει εκτραπεί τελικά από την αρχική της πορεία κατά γωνία φ. Η γωνία φ ονομάζεται **γωνία εκτροπής**.

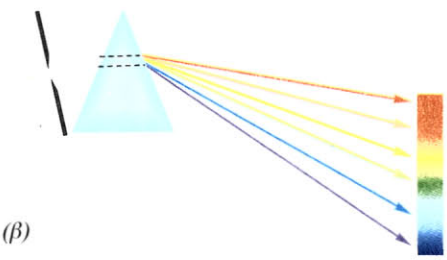


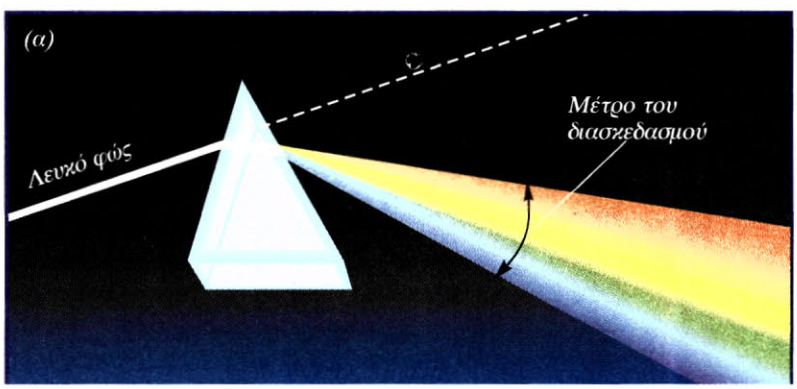
1-6 *Ακτίνα φωτός που διαθλάται από πρίσμα εκτρέπεται κατά γωνία φ.*

Έστω τώρα ότι έχουμε μία δέσμη λευκού φωτός που προσπίπτει πάνω σε ένα πρίσμα (σχήμα 1-7α). Οι ακτίνες που εξέρχονται από το πρίσμα εκτρέπονται και διασκορπίζονται στο χώρο εξόδου, ενώ ταυτόχρονα το λευκό φως αναλύεται σε μία πολύχρωμη συνεχή ταινία, που περιλαμβάνει γνωστά χρώματα. Η ταινία αυτή ονομάζεται **φάσμα του λευκού φωτός**.

Τα χρώματα του φάσματος, κατά σειρά μείωσης του μήκους κύματος, είναι: ερυθρό, πορτοκαλί, κίτρινο, πράσινο, κυανό και ιώδες (σχήμα 1-7β). Τα χρώματα αυτά δεν αναλύονται σε άλλα απλούστερα και, αν τα ανασυνθέσουμε, θα αναπαραγάγουμε το λευκό φως.

*Το φαινόμενο **«διασκεδασμός»** μελετήθηκε για πρώτη φορά το 17ο αιώνα από το Ρενέ Ντεκάρτ και το Νεύτωνα.*
Ο Νεύτωνας προσπάθησε να αναλύσει περαιτέρω τις μονοχρωματικές ακτίνες του φάσματος σε άλλες απλούστερες, αλλά δεν τα κατάφερε. Το μόνο που παρατήρησε ήταν ότι το χρώμα διαχεόταν περισσότερο, αλλά παρέμενε ως έχει.





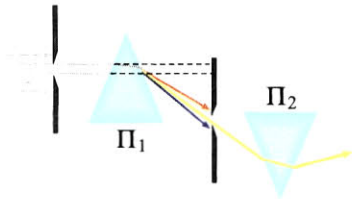
1-7 *(α) Απεικόνιση του διασκεδασμού που προκαλείται σε δέσμη λευκού φωτός από ένα πρίσμα . Η ταινία των εξερχόμενων χρωμάτων ονομάζεται φάσμα. (β) Τα βασικά χρώματα του φάσματος.*

Παρατηρώντας την εικόνα του σχήματος 1-7β βλέπουμε ότι οι ιώδεις ακτίνες εκτρέπονται περισσότερο, ενώ οι ερυθρές λιγότερο από τις άλλες που βρίσκονται ανάμεσά τους. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η γωνία εκτροπής εξαρτάται από το μήκος κύματος κάθε χρώματος.

Συμπερασματικά, το φως εμφανίζει τα εξής χαρακτηριστικά σε σχέση με τη διάδοσή του σε οπτικά μέσα:

- **Κάθε μονοχρωματική ακτίνα φωτός, όταν διαδίδεται σε ένα συγκεκριμένο οπτικό μέσο, χαρακτηρίζεται από ένα μοναδικό μήκος κύματος, που είναι η ταυτότητα του χρώματος για το μέσο αυτό.**
- **Ο δείκτης διάθλασης του οπτικού μέσου έχει διαφορετική τιμή για κάθε χρώμα** (πίνακας 1.2).
- **Η γωνία εκτροπής κάθε χρώματος, όταν αυτό διέρχεται από οπτικό μέσο, εξαρτάται από το μήκος κύματος του χρώματος και όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος τόσο μικρότερη είναι η γωνία εκτροπής.**

Η Αντίληψη ενός χρώματος παραμένει η ίδια σε οποιοδήποτε μέσο διάδοσης. Αυτό εξηγήται από το γεγονός ότι η συχνότητα, η οποία είναι υπεύθυνη για το ερέθισμα στο μάτι, είναι αμετάβλητη σε όλα τα μέσα διάδοσης του φωτός. Δηλαδή το κόκκινο χρώμα φαίνεται κόκκινο απ' όσα οπτικά μέσα και αν περάσει το φώς πριν φθάσει στο μάτι.



1-8 Το μονοχρωματικό φως δεν αναλύεται σε άλλες απλούστερες ακτινοβολίες. Το πρίσμα $Π_1$ αναλύει το λευκό φως, όμως το $Π_2$ απλώς εκτρέπει την κίτρινη ακτίνα.

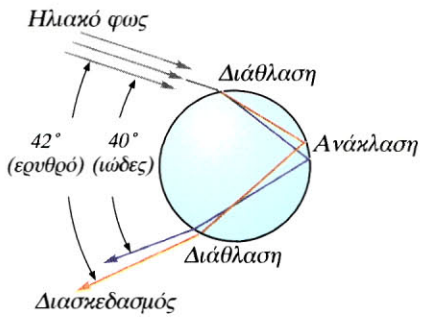
Πίνακας 1.2
Δείκτης διάθλασης στεφανύαλου

Χρώμα	Δείκτης διάθλασης
Ιώδες	*1,532*
Μπλε	*1,528*
Πράσινο	*1,519*
Κίτρινο	*1,517*
Πορτοκαλί	*1,514*
Κόκκινο	*1,513*

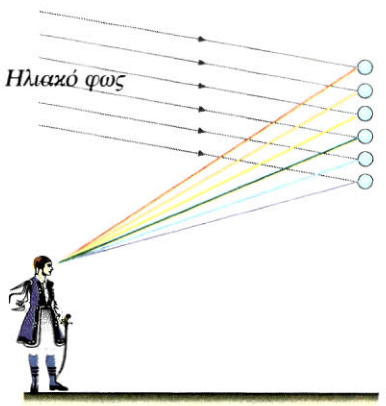
Ουράνιο τόξο - Τα χρώματα της φύσης

Έχουμε παρατηρήσει πολλές φορές, τις βροχερές μέρες με λίγο Ήλιο, να εμφανίζεται στον ουρανό το ουράνιο τόξο. Εκείνη τη στιγμή η φύση συνδυάζει δύο φαινόμενα, το διασκεδασμό και την ολική ανάκλαση, και μας δίνει την ευκαιρία να χαρούμε την ωραιότητα των αποτελεσμάτων του συνδυασμού αυτού. Το φως, όπως έρχεται **πίσω από τον παρατηρητή**, αφού διαθλαστεί και υποστεί ολική ανάκλαση στις μικρές σταγόνες της βροχής, εξέρχεται από αυτές και κατευθύνεται προς τα μάτια του.

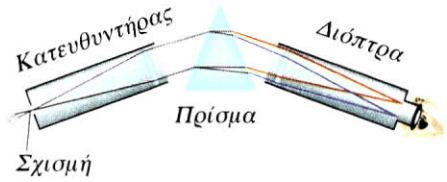
Ο διασκεδασμός προκαλεί τη διάθλαση των χρωμάτων σε διαφορετικές γωνίες και έτσι έχουμε την ανάλυση του φωτός στα χρώματα της ίριδας.



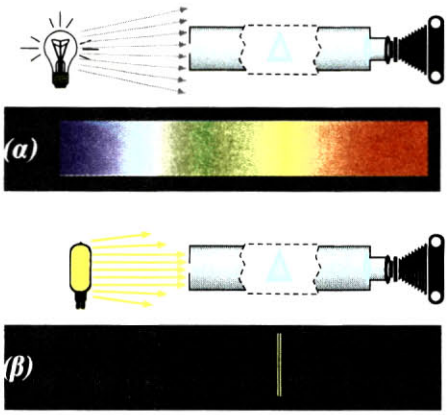
1-9 Διάθλαση ηλιακού φωτός σε σταγόνα βροχής.



1-10 Η Ισμήνη με το Φαίδωνα στο Μυστρά με φόντο το ουράνιο τόξο και την κοιλάδα του Ευρώτα.



1-11 Αρχή λειτουργίας του φασματοσκοπίου. *Με τη διόπτρα παρατηρούμε τα διάφορα χρώματα του φάσματος. Αν θέλουμε να αποτυπώσουμε το φάσμα, υπάρχουν ειδικές φωτογραφικές μηχανές που προσαρμόζονται στο προσοφθάλμιο σύστημα της διόπτρας.*



1-12 *Φάσματα εκπομπής που αποτυπώνονται στο φιλμ του φασματογράφου: (α) λαμπτήρα πυρακτώσεως, (β) λαμπτήρα νατρίου.*

Στις αρχές του 19ου αιώνα είχε ανακαλυφθεί ότι κάθε στοιχείο παρουσιάζει ένα συγκεκριμένο σύνολο μηκών κύματος στο γραμμικό του φάσμα. Με την πάροδο του χρόνου η αναγνώριση στοιχείων από τα φάσματά τους εξελίχθηκε σε μια χρήσιμη τεχνική ανάλυσης. Το χαρακτηριστικό φάσμα ενός ατόμου φαινόταν να σχετίζεται με την εσωτερική του δομή, αλλά οι προσπάθειες να εξηγηθεί αυτό με την κλασική μηχανική και την ηλεκτροδυναμική δεν ήταν επιτυχείς. Τη λύση την έδωσε η εισαγωγή της κβαντομηχανικής στο παιχνίδι της έρευνας, η οποία οδήγησε σε δραστικές αλλαγές των απόψεων για τη φύση της ακτινοβολίας και την αλληλεπίδρασή της με την ύλη.

Το φασματοσκόπιο

Το **φασματοσκόπιο** (ή **φασματογράφος**) πρίσματος είναι ένα όργανο με το οποίο γίνεται η ανάλυση μίας δέσμης φωτός και η μελέτη του φάσματός της. Αποτελείται από τρία βασικά μέρη, τον **κατευθυντήρα**, το **πρίσμα** και τη **διόπτρα**. Το φως μίας πηγής εισέρχεται στον κατευθυντήρα, εξέρχεται από αυτόν, έτσι ώστε οι ακτίνες να είναι μεταξύ τους παράλληλες, προσπίπτει στο πρίσμα και αναλύεται στο φάσμα του. Οι εξερχόμενες ακτίνες παρατηρούνται από τη διόπτρα. Περιστρέφοντας το πρίσμα ή τη διόπτρα μπορούμε να παρατηρήσουμε τα διάφορα μήκη κύματος.

Αν στη διόπτρα προσαρμόσουμε το φακό μιας φωτογραφικής μηχανής, το φάσμα αποτυπώνεται στο φιλμ (**φασματογράφος**) και έτσι μπορούμε να μελετάμε τα μήκη κύματος του φωτός που εκπέμπει μία πηγή, λόγου χάρη το πυρακτωμένο νήμα ενός λαμπτήρα φωτισμού (λαμπτήρας πυρακτώσεως), ή μία λυχνία ατμών νατρίου.

Φάσματα εκπομπής

Το φάσμα της ακτινοβολίας που εκπέμπει μία φωτεινή πηγή ονομάζεται **φάσμα εκπομπής** της πηγής αυτής. Τα φάσματα εκπομπής των διάφορων πηγών διακρίνονται σε **συνεχή** και **γραμμικά**.

(α) Συνεχή φάσματα εκπομπής. Συνεχή φάσματα παίρνουμε, όταν εξετάζουμε με το φασματογράφο το φως που εκπέμπουν *στερεά* και *υγρά* σώματα τα οποία βρίσκονται σε μεγάλη θερμοκρασία (διάπυρα σώματα). Αν η πηγή του φωτός είναι, για παράδειγμα, ο λαμπτήρας πυρακτώσεως, τότε το φάσμα είναι μία συνεχής ταινία χρωμάτων, ακριβώς όπως την περιγράψαμε προηγουμένως. Επίσης συνεχές φάσμα εκπέμπουν ο λιωμένος σίδηρος, ο λιωμένος χαλκός κτλ.

Επειδή τα συνεχή φάσματα, που εκπέμπονται από διάφορα διάπυρα σώματα, δε διαφέρουν μεταξύ τους, η μελέτη τέτοιων φασμάτων δεν μπορεί να μας δώσει πληροφορίες για τη φύση του σώματος, αν δηλαδή το σώμα αποτελείται από κάποιο συγκεκριμένο υλικό, όπως π.χ. σίδηρο, χαλκό κτλ. Η μοναδική πληροφορία που παίρνουμε είναι για τη θερμοκρασία του υλικού.

(β) Γραμμικά φάσματα εκπομπής. Αν εξετάσουμε με το φασματοσκόπιο το φως που εκπέμπουν *θερμά αέρια* ή *ατμοί*, τότε διαπιστώνουμε ότι το φάσμα τους, που αποτυπώνεται στο φιλμ, αποτελείται από διακριτές χρωματιστές γραμμές, χαρακτηριστικές για το είδος των αερίων ή των ατμών. Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο μήκος κύματος ή συχνότητα. Αν κάνουμε, λόγου χάρη, φασματοσκοπική ανάλυση του φωτός που εκπέμπει η λυχνία ατμών νατρίου, θα παρατηρήσουμε ότι το φάσμα του αποτελείται από δύο κίτρινες γραμμές πολύ κοντά μεταξύ τους (σχήμα 1-12).

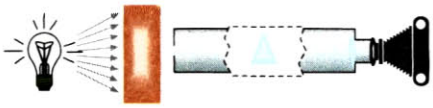
Φάσματα απορρόφησης

Αν μεταξύ μίας φωτεινής πηγής που εκπέμπει λευκό φως και του κατευθυντήρα ενός φασματογράφου παρεμβάλουμε ένα υλικό μέσο, λόγου χάρη ένα δοχείο που να περιέχει έγχρωμο υγρό ή μια έγχρωμη γυάλινη πλάκα (σχήμα 1-13), θα διαπιστώσουμε ότι ορισμένες περιοχές του συνεχούς φάσματος λείπουν και στη θέση

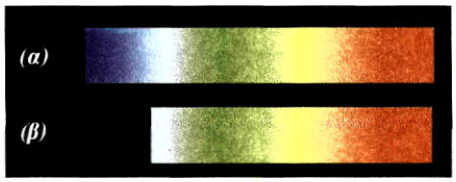
τους εμφανίζονται σκοτεινές περιοχές. Τα φάσματα αυτά τα ονομάζουμε **φάσματα απορρόφησης**, γιατί οι σκοτεινές περιοχές οφείλονται στο ότι οι ακτίνες ορισμένων χρωμάτων έχουν απορροφηθεί κατά τη διέλευσή τους από το υλικό μέσο. Τα φάσματα απορρόφησης τα διακρίνουμε σε **συνεχή** και **γραμμικά**.

(α) Συνεχή φάσματα απορρόφησης δίνουν τα έγχρωμα διαφανή στερεά και υγρά. Αν το υλικό που φωτίζουμε είναι γυάλινη κόκκινη πλάκα, τότε παίρνοντας το φάσμα θα παρατηρήσουμε ότι έχουν απορροφηθεί ορισμένες περιοχές του συνεχούς φάσματος εκπομπής. Συγκεκριμένα, από την κόκκινη πλάκα διέρχονται μόνο οι ακτίνες που βρίσκονται στην περιοχή του ερυθρού (σχήμα 1-13β).

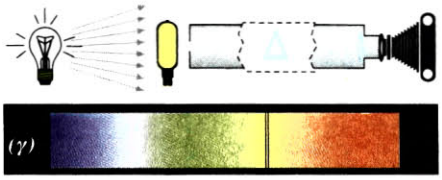
(β) Γραμμικά φάσματα απορρόφησης δίνουν τα αέρια ή οι ατμοί. Αποτελούνται από ένα συνεχές φάσμα στο οποίο υπάρχουν σκοτεινές γραμμές. Έτσι, αν μεταξύ μίας φωτεινής πηγής που εκπέμπει λευκό φως και του κατευθυντήρα ενός φασματογράφου παρεμβάλουμε ένα διαφανές δοχείο με ατμούς νατρίου (σχήμα 1-13γ), τότε στο συνεχές φάσμα του λευκού φωτός του λαμπτήρα θα παρατηρήσουμε σκοτεινές γραμμές, στις θέσεις ακριβώς εκείνες που θα εμφανίζονταν οι κίτρινες γραμμές του φάσματος εκπομπής των ατμών του νατρίου. Δηλαδή οι ατμοί του νατρίου έχουν απορροφήσει τις κίτρινες ακτινοβολίες που εκπέμπουν, όταν ακτινοβολούν.



1-13 Τυπική διάταξη για την αποτύπωση του φάσματος απορρόφησης. Το κόκκινο γυαλί επιτρέπει τη διέλευση ακτίνων με μήκη κύματος κοντά στην περιοχή του ερυθρού.



(α) Συνεχές φάσμα εκπομπής λευκού φωτός.
(β) Συνεχές φάσμα απορρόφησης κόκκινου γυαλιού.



(γ) Γραμμικό φάσμα απορρόφησης ατμών Na.

Υπεριώδης και υπέρυθρη ακτινοβολία

Υπεριώδης ακτινοβολία

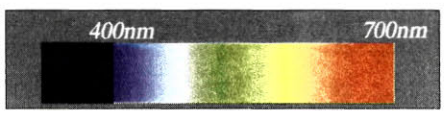
Το συνεχές φάσμα που παίρνουμε, όταν αναλύουμε με το φασματοσκόπιο το λευκό φως, τελειώνει στο ένα άκρο με ιώδες φως, ενώ στο άλλο με ερυθρό. Όπως φαίνεται από το σχήμα 1-14, το ορατό φως, δηλαδή τα μήκη κύματος που αντιλαμβάνεται το μάτι μας, έχει όρια και τα χρώματά του έχουν μήκη κύματος που κυμαίνονται μεταξύ 400nm του ιώδους και 700nm του ερυθρού. Αυτό όμως δε σημαίνει ότι το φάσμα του λευκού φωτός, που εκπέμπει η φωτεινή πηγή, περιορίζεται σε αυτά τα όρια.

Αν παρατηρήσουμε με ειδικό φασματογράφο τη φωτογραφική πλάκα στην οποία αποτυπώνεται το φάσμα, θα διαπιστώσουμε ότι πέρα από το όριο της ιώδους περιοχής η πλάκα έχει αμαυρωθεί. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, εκτός από την ακτινοβολία της ορατής περιοχής του φάσματος, υπάρχει και ακτινοβολία αόρατη, η οποία βρίσκεται πέρα από την ιώδη περιοχή. Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται **υπεριώδης ακτινοβολία**.

Η υπεριώδης ακτινοβολία αποτελείται από ακτινοβολίες που έχουν μήκη κύματος μικρότερα των 400nm και μεγαλύτερα του 1nm περίπου.

Αν και η υπεριώδης ακτινοβολία δεν είναι ορατή με γυμνό μάτι, μερικές από τις ιδιότητές της μας πληροφορούν για την ύπαρξή της:

1. Προκαλεί αμαύρωση των φωτογραφικών πλακών.
2. Προκαλεί το φθορισμό σε διάφορα σώματα, όταν δηλαδή προσπίπτει σε ορισμένα σώματα, τότε αυτά εκπέμπουν χαρακτηριστικές ορατές ακτινοβολίες.



1-14 Φάσμα υπεριώδους - γκρίζα περιοχή στο φιλμ πέρα από το ιώδες.

(α) *(β)*

1-15 Δύο φωτογραφίες του ίδιου αγαλματιδίου τραβηγμένες η (α) στο ορατό φως και η (β) στο υπεριώδες.

1-16 Η φωτογραφία έχει ληφθεί με φιλμ ευαίσθητο στο υπέρυθρο φως. Η αντίστοιχη του ορατού φωτός δεν ήταν δυνατό να ληφθεί, γιατί τη στιγμή της λήψης επικρατούσε σκοτάδι.

3. Συμμετέχει στη μετατροπή του οξυγόνου της ατμόσφαιρας σε όζον.
4. Όταν απορροφάται από υλικά σώματα (όπως άλλωστε και οι ακτίνες οποιουδήποτε χρώματος), προκαλεί τη θέρμανσή τους.
5. Υπεριώδης ακτινοβολία με πολύ μικρό μήκος κύματος προκαλεί βλάβες στα κύτταρα του δέρματος, οι οποίες μπορεί να είναι τέτοιες, ώστε να οδηγήσουν και στην εμφάνιση καρκίνου. Κατά τη διάρκεια της ηλιοθεραπείας το μαύρισμα του δέρματος οφείλεται στη μελανίνη που παράγει ο οργανισμός, για να προστατευθεί από την υπεριώδη ακτινοβολία.
6. Χρησιμοποιείται στην Ιατρική για πλήρη αποστείρωση διάφορων εργαλείων.

Υπέρυθρη ακτινοβολία

Αναλύοντας το λευκό φως ενός λαμπτήρα πυρακτώσεως πάνω σε πέτασμα παίρνουμε το φάσμα του. Αν τοποθετήσουμε ένα ευαίσθητο θερμόμετρο πάνω στο πέτασμα και το μετακινήσουμε από το ιώδες προς το ερυθρό, θα παρατηρήσουμε τη θερμοκρασία του να αυξάνεται. Πιο πέρα από το ερυθρό η ένδειξη είναι ακόμη μεγαλύτερη.

Μετά την ερυθρή περιοχή του φάσματος υπάρχει αόρατη ακτινοβολία, που προκαλεί έντονη αύξηση της θερμοκρασίας των στερεών και υγρών σωμάτων. Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται **υπέρυθρη ακτινοβολία**.

Επειδή η υπέρυθρη ακτινοβολία είναι αόρατη, για την ανίχνευσή της υπάρχουν ειδικά όργανα, **οι φωρατές υπερύθρου**. Η αρχή λειτουργίας των φωρατών βασίζεται στην απορρόφηση ενέργειας των υπέρυθρων ακτινοβολιών και στη συνέχεια στη μετατροπή της σε άλλες μορφές. Οι υπέρυθρες ακτινοβολίες έχουν μήκη κύματος που κυμαίνονται μεταξύ 700nm και 10^6nm. Μερικές από τις ιδιότητες των υπερύθρων είναι οι εξής:

1. Απορροφώνται επιλεκτικά από διάφορα σώματα και προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας τους.
2. Διέρχονται μέσα από την ομίχλη και τα σύννεφα (δεν απορροφώνται από αέρια, σχήμα 1-17).
3. Δεν έχουν χημική δράση και δεν προκαλούν φωσφορισμό.

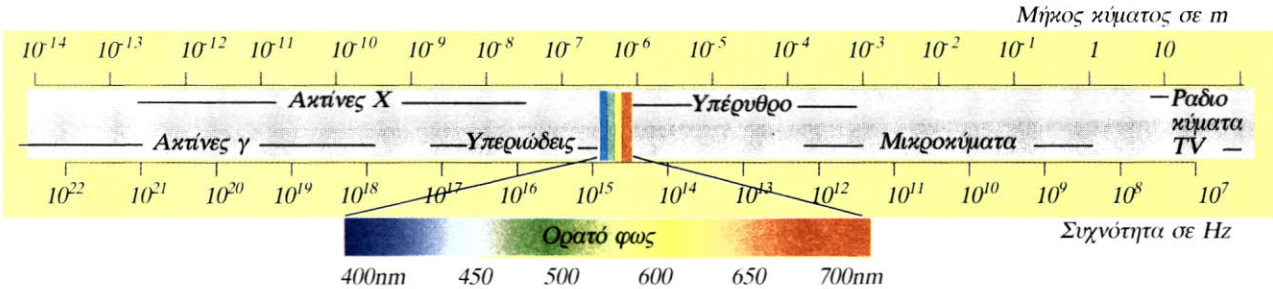
Εφαρμογές: Η χρήση των υπερύθρων βασίζεται στην εκλεκτικότητά τους να απορροφώνται από την ύλη. Στην Ιατρική, για παράδειγμα, δέσμη υπέρυθρης ακτινοβολίας μεταδίδει θερμότητα σε ορισμένη περιοχή του σώματος. Επίσης με ειδικές φωτογραφικές μηχανές πετυχαίνεται φωτογράφιση ακόμη και όταν υπάρχει συννεφιά ή ομίχλη (σχήμα 1-17).

(α)

(β)

1-17 Δύο φωτογραφίες του ίδιου τοπίου, την ίδια στιγμή. Η (α) έχει ληφθεί με φιλμ του εμπορίου, ενώ η (β) με φιλμ ευαίσθητο στην υπέρυθρη ακτινοβολία και με χρήση φίλτρου που επιτρέπει μόνο τη διέλευση υπέρυθρου φωτός.

Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. *Τα όρια μεταξύ των ζωνών είναι κάπως αυθαίρετα.*



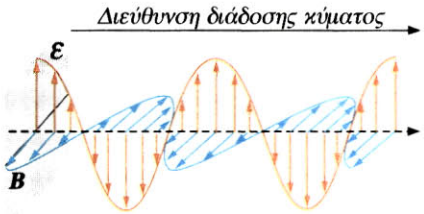
1.5 ΠΟΛΩΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Φυσικό φως και γραμμικά πολωμένο φως

Όπως είδαμε σε προηγούμενη ενότητα, το φως (όπως άλλωστε ολόκληρη η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία ξεκινούν από μία φωτεινή πηγή και κινούνται ευθύγραμμα προς όλες τις κατευθύνσεις.

Οι συνήθεις φωτεινές πηγές (π.χ. λαμπτήρας πυρακτώσεως, Ήλιος κτλ.) αποτελούνται από μεγάλο αριθμό ατόμων ή μορίων. Τα φωτεινά κύματα παράγονται από όλα τα άτομα και μόρια του υλικού που εκπέμπει το φως. Κάθε άτομο ή μόριο εκπέμπει ένα μεμονωμένο κύμα.

Σε κάθε τέτοιο κύμα το ηλεκτρικό πεδίο έχει διεύθυνση ταλάντωσης κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Η διεύθυνση ταλάντωσης και η διεύθυνση διάδοσης καθορίζουν ένα συγκεκριμένο επίπεδο ταλάντωσης για κάθε μεμονωμένο κύμα (σχήμα 1-18). Καταλαβαίνουμε λοιπόν ότι:



1-18 Στιγμότυπο ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Όπως γνωρίζουμε, το ηλεκτρομαγνητικό κύμα αποτελείται από δύο εγκάρσια κύματα κάθετα μεταξύ τους, ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό.

Το φυσικό φως είναι σύνθεση πολλών κυμάτων με διάφορα επίπεδα ταλάντωσης των ηλεκτρικών και μαγνητικών τους πεδίων και τυχαίες διευθύνσεις διάδοσης.

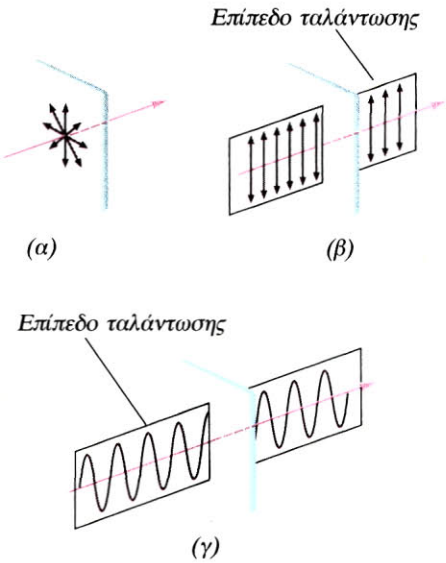
Για να κατανοήσουμε το φαινόμενο της πόλωσης, αρκεί να περιοριστούμε στη μελέτη μόνο του ηλεκτρικού κύματος. Αν το επίπεδο ταλάντωσης του ηλεκτρικού πεδίου ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι σταθερό με το χρόνο, τότε το κύμα ονομάζεται **γραμμικά πολωμένο**.

Άρα:

Το φως είναι γραμμικά πολωμένο, όταν το επίπεδο ταλάντωσης του ηλεκτρικού του πεδίου έχει έναν καθορισμένο προσανατολισμό στο χώρο και μία καθορισμένη διεύθυνση διάδοσης.

Το φυσικό φως που δεχόμαστε απευθείας από μια φωτεινή πηγή, επειδή προέρχεται από πολλά άτομα ή μόρια, έχει πολλά επίπεδα ταλάντωσης και συνεπώς δεν είναι πολωμένο.

Το φυσικό φως απεικονίζεται παραστατικά στο σχήμα 1-19α, ενώ το γραμμικά πολωμένο φως στο σχήμα 1-19β, γ.



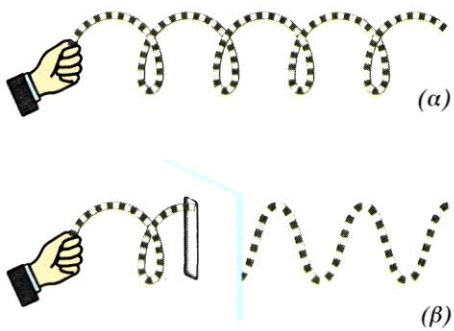
1-19 (α) Το φυσικό φως και (β), (γ) το γραμμικά πολωμένο φως.

Πολωτικό φίλτρο - Πολωτής

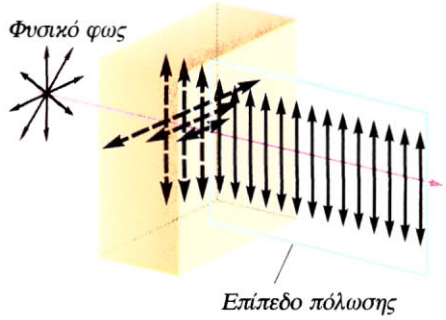
Το φυσικό φως είναι δυνατόν, περνώντας από κατάλληλα φίλτρα (πολωτές) ή παθαίνοντας κατάλληλη ανάκλαση, να μετατραπεί σε γραμμικά πολωμένο φως.

Για να κατανοήσουμε τι είναι ακριβώς το πολωτικό φίλτρο, ας παρακολουθήσουμε τη διαδικασία πόλωσης ενός μηχανικού κύματος. Θυμίζουμε ότι ένα από τα μηχανικά κύματα είναι και αυτό που παράγεται, όταν αναγκάζουμε την άκρη ενός σχοινιού να πάλλεται. Δημιουργούμε έτσι ένα εγκάρσιο κύμα (σχήμα 1-20α), το οποίο διαδίδεται ακανόνιστα. Δηλαδή κάθε στοιχειώδες κομμάτι του σχοινιού πάλλεται σε διαφορετικά επίπεδα.

Αν παρεμβάλουμε ένα πέτασμα με κατακόρυφη σχισμή στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (σχήμα 1-20β), έτσι ώστε το σχοινί



1-20 Πίσω από τη σχισμή το κύμα είναι πολωμένο.

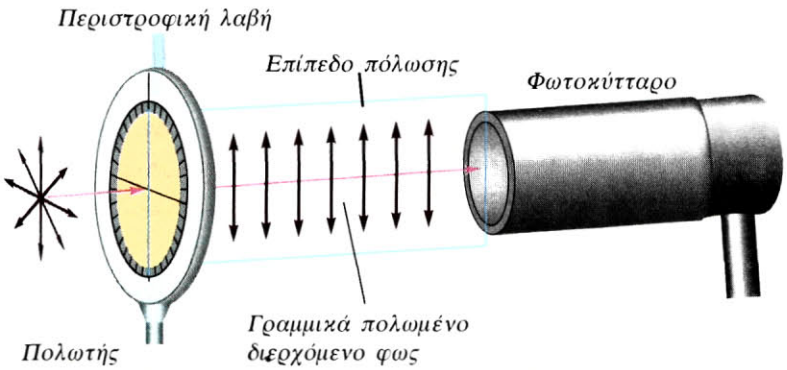


1-21 *Φυσικό φως διέρχεται από πολωτικό φίλτρο. Οι οριζόντιες ταλαντώσεις έχουν απορροφηθεί ολοσχερώς, ενώ οι κατακόρυφες μερικώς.*

να διέρχεται από αυτό, τότε τα στοιχειώδη κομμάτια του σχοινιού που βρίσκονται μετά το πέτασμα πάλλονται σε ένα και μόνο επίπεδο, το χαρακτηριστικό επίπεδο που ορίζει η σχισμή με τη διεύθυνση διάδοσης. Η σχισμή στην παραπάνω διαδικασία αποτέλεσε το **πολωτικό φίλτρο**. Το φαινόμενο ονομάζεται **πόλωση του μηχανικού κύματος**.

Για την πόλωση του φυσικού φωτός χρησιμοποιούμε ειδικά πολωτικά φίλτρα. Όταν το φως προσπέσει σε πολωτικό φίλτο, τότε το φως που εξέρχεται από αυτό είναι πολωμένο. Το επίπεδο ταλάντωσης είναι αυτό που καθορίζεται από το υλικό του φίλτρου. Τα κύματα με επίπεδο ταλάντωσης κάθετο προς το επίπεδο που καθορίζει το φίλτρο ανακόπτονται κατά μεγάλο ποσοστό (σχήμα 1-21). Η συσκευή που περιέχει το πολωτικό φίλτρο ονομάζεται **πολωτής**. Είναι μια διάταξη κατασκευασμένη έτσι, ώστε να μπορούμε να στρέφουμε το πολωτικό φίλτρο, που έχει μορφή πλακιδίου, γύρω από άξονα κάθετο προς το επίπεδό του (σχήμα 1-22).

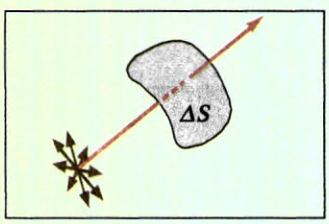
1-22 *Για οποιαδήποτε γωνία προσανατολισμού του επιπέδου πόλωσης το φωτοκύτταρο μετράει την ίδια ένταση φωτός και τη βρίσκει ίση ακριβώς με το μισό της έντασης του προσπίπτοντος στο πλακίδιο του πολωτή.*



1-23 *Με τον όρο **«ένταση του προσπίπτοντος φωτός»** εννοούμε την ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας. Ας το δούμε αναλυτικά:*
Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα έχουν ενέργεια, όπως για παράδειγμα η ακτινοβολία του Ήλιου και η ακτινοβολία των φούρνων μικροκυμάτων. Έστω λοιπόν ότι έχουμε μια στοιχειώδη επιφάνεια ΔS, κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, που δέχεται συνεχώς ενέργεια ΔW σε χρόνο Δt. Το πηλίκο $\Delta W/\Delta t$ ονομάζεται ισχύς.
*Η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας ορίζεται ως **ένταση** του κύματος. Δηλαδή:*

$$I = \frac{\frac{\Delta W}{\Delta t}}{\Delta S} = \frac{P}{\Delta S}$$

Η μονάδα μέτρησης της έντασης στο S.I. είναι το $1 W/m^2$.



Αποδεικνύεται ότι η ένταση του κύματος είναι ανάλογη προς το τετράγωνο του πλάτους $\mathcal{E}_0$ του ηλεκτρικού πεδίου του κύματος.

Ένας **τέλειος** πολωτής επιτρέπει τη διέλευση κατά 100% του προσπίπτοντος φωτός, όταν αυτό είναι πολωμένο στο επίπεδο πόλωσης του φίλτρου, και ανακόπτει τελείως τα κύματα φωτός που είναι πολωμένα σε διεύθυνση κάθετη προς το επίπεδο αυτό.

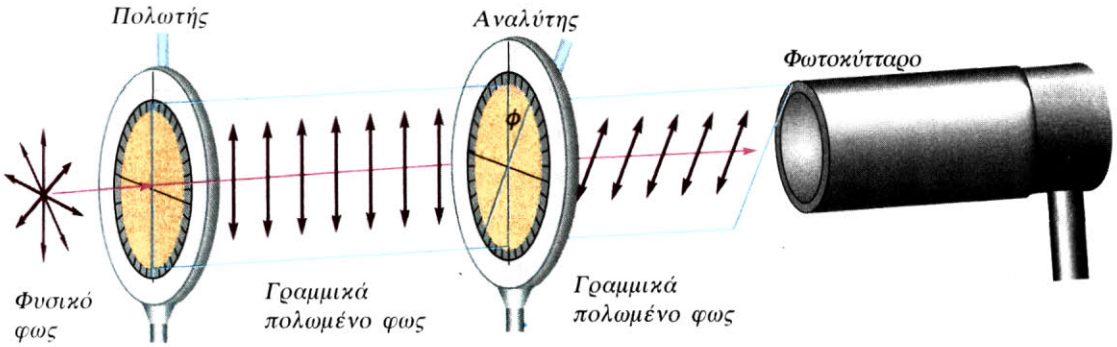
Το επίπεδο πόλωσης του πολωτή είναι **χαρακτηριστικό του πλακιδίου** και η διεύθυνσή του καθορίζεται κάθε φορά από την περιστροφική λαβή, που βρίσκεται στην κορυφή του. Άρα, περιστρέφοντας τη λαβή, καθορίζουμε τη θέση του χαρακτηριστικού επιπέδου πόλωσης του πολωτή.

Έτσι, στο σχήμα 1-22, φυσικό φως προερχόμενο από λαμπτήρα πυρακτώσεως προσπίπτει σε έναν πολωτή. Το επίπεδο πόλωσης και η περιστροφική λαβή είναι σημειωμένα με μπλε χρώμα. Ο πολωτής επιτρέπει τη διέλευση μόνο των κυμάτων φωτός που έχουν ένταση ηλεκτρικού πεδίου παράλληλη προς το επίπεδο πόλωσης του πλακιδίου. Έτσι το φως που βγαίνει από τον πολωτή είναι γραμμικά πολωμένο παράλληλα προς το επίπεδο πόλωσης.

Αν τώρα επιχειρήσουμε να μετρήσουμε την ένταση του εξερχόμενου φωτός με ένα φωτοκύτταρο, θα παρατηρήσουμε ότι, για οποιαδήποτε γωνία προσανατολισμού του επιπέδου πόλωσης, η ένταση του φωτός έχει την ίδια τιμή, η οποία μάλιστα είναι ίση με το μισό της έντασης του προσπίπτοντος φωτός.

Συνδυασμός δύο πολωτικών φίλτρων - Αναλύτης

Ας υποθέσουμε ότι μεταξύ του φωτοκύτταρου και του πρώτου πολωτή τοποθετούμε ένα δεύτερο, όμοιο κατασκευαστικά. Το επίπεδο πόλωσης του πρώτου πολωτή έστω ότι παραμένει κατακόρυφο, ενώ του δεύτερου, τον οποίο ονομάζουμε **αναλύτη**, σχηματίζει γωνία φ με την κατακόρυφο (σχήμα 1-24).



1-24 *Ο τέλειος αναλύτης επιτρέπει τη διέλευση μόνο της συνιστώσας του ηλεκτρικού πεδίου που είναι παράλληλη προς το χαρακτηριστικό επίπεδο πόλωσής του.*

Αυτό σημαίνει ότι η γωνία μεταξύ των δύο επιπέδων πόλωσης είναι φ. Το τι θα συμβεί κατά τη διέλευση του πολωμένου φωτός από τον αναλύτη εξαρτάται από τη γωνία φ.

Όταν τα χαρακτηριστικά επίπεδα του πολωτή και του αναλύτη συμπίπτουν (φ=0), το πολωμένο φως θα διέλθει από τον αναλύτη χωρίς να υποστεί μεταβολή.

Όταν τα χαρακτηριστικά επίπεδα του πολωτή και του αναλύτη είναι κάθετα (φ=90°), το πολωμένο φως θα ανακοπεί εντελώς από τον αναλύτη. Το φωτοκύτταρο τότε δεν ανιχνεύει φως.

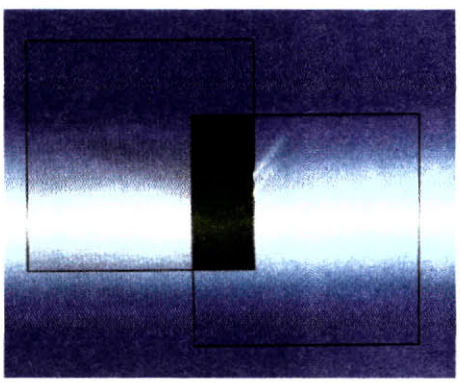
Για οποιαδήποτε άλλη γωνία φ μεταξύ των χαρακτηριστικών επιπέδων του πολωτή και του αναλύτη το πολωμένο φως θα διέρχεται εν μέρει.

Παρατηρούμε ότι η διαφορά μεταξύ του πολωτή και του αναλύτη εντοπίζεται μόνο στους σκοπούς τους οποίους αυτοί εξυπηρετούν, δηλαδή σε ένα πείραμα ο πολωτής μπορεί να παίξει το ρόλο του αναλύτη και αντίστροφα.

Χρησιμοποιώντας τον αναλύτη μπορούμε να διαπιστώσουμε αν μία δέσμη φωτός είναι πολωμένη ή όχι.

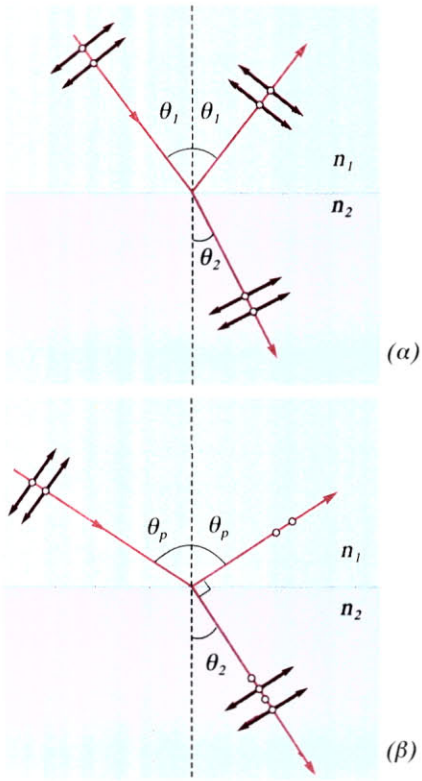
Αφήνουμε τη δέσμη να πέσει στον αναλύτη κάθετα προς αυτόν. Με την περιστροφική λαβή καθορίζουμε διάφορες γωνίες στο επίπεδο πόλωσης του αναλύτη. Αν παρατηρήσουμε ότι δεν υπάρχει γωνία για την οποία ανακόπτεται το διερχόμενο φως, τότε αυτό είναι φυσικό. Αν όμως συμβαίνει το αντίθετο, δηλαδή υπάρχουν γωνίες για τις οποίες ανακόπτεται το διερχόμενο φως, τότε το φως είναι γραμμικά πολωμένο.

Τα υλικά που έχουν την ιδιότητα να αφήνουν να τα διαπερνά μόνο το φως του οποίου το ηλεκτρικό πεδίο ταλαντώνεται σε συγκεκριμένη διεύθυνση λέγονται διχροϊκά. Το 1938 ο E.H. Land ανακάλυψε ένα υλικό που ονόμασε polaroid. Το polaroid πολώνει το φως, γιατί τα προσανατολισμένα μόριά του έχουν την ιδιότητα να απορροφούν επιλεκτικά τη διερχόμενη ακτινοβολία από μέσα του.



1-25 *Ένας πολωτής και ένας αναλύτης με επίπεδα πόλωσης κάθετα μεταξύ τους ανακόπτουν το φως (σκοτεινή περιοχή).*

Πόλωση από ανάκλαση - Φυσική πόλωση



1-26 (α) Όταν μη πολωμένο φως προσπίπτει σε διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών, η ανακλώμενη και η διαθλώμενη ακτίνα είναι μερικώς πολωμένες. (β) Όταν μη πολωμένο φως προσπίπτει σε ανακλώσα επιφάνεια υπό γωνία ίση με τη γωνία ολικής πόλωσης, η ανακλώμενη και η διαθλώμενη ακτίνα είναι κάθετες μεταξύ τους.

Όταν μη πολωμένο φως προσπίπτει πάνω σε διαχωριστική επιφάνεια δύο οπτικών υλικών μέσων με δείκτες διάθλασης n_1 και n_2, τότε εν μέρει ανακλάται και εν μέρει διαθλάται.

Αν εξετάσουμε με αναλύτη την ανακλώμενη δέσμη, θα παρατηρήσουμε ότι, όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι περίπου 0° ή περίπου 90°, το ανακλώμενο φως δεν είναι πολωμένο. Για ενδιάμεσες γωνίες πρόσπτωσης το ανακλώμενο φως είναι μερικώς πολωμένο, δηλαδή αποτελείται από γραμμικά πολωμένο φως και μη πολωμένο φως. Υπάρχει μία συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης, που ονομάζεται **γωνία ολικής πόλωσης (θ_p)**, για την οποία το ανακλώμενο φως είναι πλήρως πολωμένο.

Ας προσπαθήσουμε να παραστήσουμε γραφικά το φαινόμενο χρησιμοποιώντας δύο συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου, μία παράλληλη προς την ανακλώσα επιφάνεια (με τελείες) και μία κάθετη προς την πρώτη και τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (με βέλη). Έτσι στο σχήμα 1-26α έχουμε μερική πόλωση του προσπίπτοντος φωτός, δηλαδή η ανακλώμενη δέσμη και η διαθλώμενη είναι μερικώς πολωμένες.

Υποθέτουμε τώρα ότι μεταβάλλουμε τη γωνία πρόσπτωσης, ώσπου η ανακλώμενη και η διαθλώμενη δέσμη να σχηματίζουν γωνία 90°, δηλαδή να ισχύει $\theta_2+\theta_p=90^o$. Τότε η ανακλώμενη δέσμη είναι πλήρως πολωμένη, ενώ η διαθλώμενη είναι μερικώς πολωμένη (σχήμα 1-26β).

Η γωνία ολικής πόλωσης θ_p συνδέεται με τους δείκτες διάθλασης n_1 και n_2 των δύο οπτικών υλικών. Η σύνδεση αυτή προκύπτει από το νόμο του Snell (Σνελ), σύμφωνα με τον οποίο ο λόγος n_2/n_1 των δεικτών διάθλασης είναι αντιστρόφως ανάλογος των ημιτόνων των γωνιών πρόσπτωσης θ_1 και διάθλασης θ_2, δηλαδή:

Νόμος του Snell

$$\frac{n_2}{n_1}=\frac{\eta\mu\,\theta_1}{\eta\mu\,\theta_2} \qquad (1.6)$$

Εφαρμόζοντας λοιπόν την παραπάνω σχέση για $\theta_1=\theta_p$ και για $\theta_2=90^o-\theta_p$ έχουμε:

$$\frac{n_2}{n_1}=\frac{\eta\mu\,\theta_p}{\eta\mu\,(90^o-\theta_p)}$$

Όμως από την τριγωνομετρία ισχύει: $\eta\mu(90^o-\theta_p)=\sigma\upsilon\nu\theta_p$. Άρα τελικά προκύπτει:

Νόμος του Brewster

$$\frac{n_2}{n_1}=\frac{\eta\mu\,\theta_p}{\sigma\upsilon\nu\,\theta_p} \text{ ή } \frac{n_2}{n_1}=\varepsilon\varphi\,\theta_p \qquad (1.7)$$

Η τελευταία σχέση είναι γνωστή ως νόμος του Brewster (Μπρούστερ) και η γωνία ολικής πόλωσης ονομάζεται *γωνία του Brewster.*

Άρα: **Η γωνία ολικής πόλωσης του φωτός, για κάθε μέσο, είναι εκείνη η γωνία πρόσπτωσης για την οποία η ανακλώμενη ακτίνα και η διαθλώμενη είναι κάθετες μεταξύ τους.**

Αν τώρα το ένα οπτικό υλικό είναι το κενό ή ο ξηρός αέρας, οπότε $n_1=1$, τότε $n_2=n$ και η σχέση παίρνει τη μορφή: $\mathbf{n=\varepsilon\varphi\theta_p}$.

Πόλωση και πολωτικά φίλτρα στην καθημερινή μας ζωή

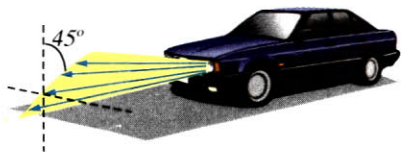
Η πόλωση από ανάκλαση είναι ένα σύνηθες φαινόμενο στη φύση. Το φως που ανακλάται από επιφάνειες λιμνών και θαλασσών, καθώς και από το χιόνι, είναι μερικώς πολωμένο. Όταν λοιπόν η ανάκλαση προέρχεται από μια τέτοια επιφάνεια, προκαλεί στα μάτια μας μια ανεπιθύμητη δυνατή «αντηλιά».

Επειδή οι ανακλώσες επιφάνειες που αναφέραμε είναι συνήθως οριζόντιες, το διάνυσμα του ανακλώμενου ηλεκτρικού πεδίου θα έχει μεγάλη οριζόντια συνιστώσα, δηλαδή το ανακλώμενο φως θα περιέχει περίσσεια πολωμένου φωτός στην οριζόντια διεύθυνση.

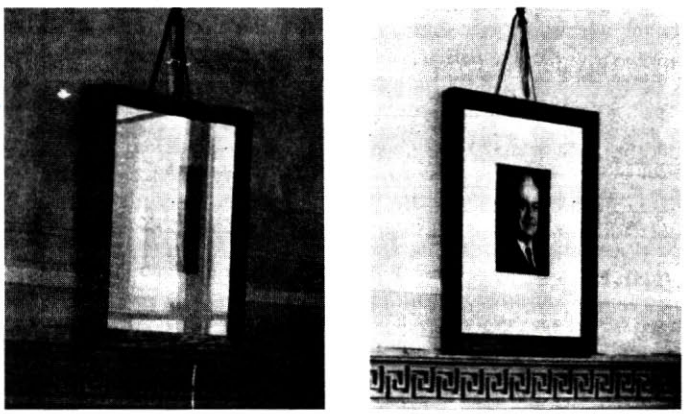
Τα γυαλιά ηλίου λοιπόν που διαθέτουν απορροφητικό φίλτρο polaroid έχουν τέτοια κατασκευή, ώστε το χαρακτηριστικό επίπεδο πόλωσής τους να είναι κατακόρυφο και να απορροφούν στο μέγιστο δυνατό την οριζόντια συνιστώσα του ανακλώμενου φωτός. Έτσι στα μάτια φτάνει ένα μικρό ποσοστό του πολωμένου φωτός.

Μία άλλη συνηθισμένη χρήση των πολωτικών φίλτρων είναι στα κρύσταλλα που καλύπτουν τα φώτα των αυτοκινήτων και στα παρμπρίζ. Και στα κρύσταλλα των φώτων και στα παρμπρίζ υπάρχουν πολωτικά φίλτρα των οποίων το χαρακτηριστικό επίπεδο πόλωσης σχηματίζει γωνία 45° με το οριζόντιο επίπεδο και έχει τον ίδιο προσανατολισμό σε όλα τα αυτοκίνητα. Όταν δύο αυτοκίνητα διασταυρώνονται τη νύχτα, το παρμπρίζ του ενός λειτουργεί ως αναλύτης για το φως των φαναριών του άλλου αυτοκινήτου, που είναι πολωμένο. Έτσι μειώνεται η ένταση του φωτός που δέχεται ο οδηγός και αποφεύγεται αισθητά η ενόχληση.

Για την πόλωση του φυσικού φωτός χρησιμοποιούμε ειδικά φίλτρα, που είναι γνωστά με την εμπορική τους ονομασία ως polaroid (πολαρόιντ). Στην καθημερινότητα είναι γνωστά για τη χρήση τους στα γυαλιά ηλίου και στους φακούς φωτογραφικών μηχανών.
Ένα τέτοιο φίλτρο επιτρέπει τη διέλευση φωτεινών κυμάτων έντασης μέχρι και ποσοστό 80%, μόνο αυτών που είναι γραμμικά πολωμένα με το καθορισμένο από το υλικό επίπεδο πόλωσης, και απορροφά περίπου το 99% της έντασης των κυμάτων που είναι πολωμένα κάθετα προς το επίπεδο αυτό.



Σημείωση: *Η πόλωση του φωτός κατά την ανάκλαση παρουσιάζεται μόνο, όταν ταυτόχρονα γίνεται και διάθλαση του φωτός. Για να εμφανίζεται επομένως κατά την ανάκλαση το φαινόμενο της πόλωσης, δεν πρέπει η ανάκλαση να γίνεται σε μεταλλικές επιφάνειες και σε επιφάνειες που παρουσιάζουν μεταλλική στιλπνότητα.*



1-27 *Πολωτικό φίλτρο έχει χρησιμοποιηθεί στη φωτογράφιση των διπλανών εικόνων, που προφυλάσσονται από γυαλί. Η πρώτη έχει φωτογραφηθεί χωρίς φίλτρο και εμφανίζει έντονο φως από ανάκλαση. Με την παρεμβολή πολωτικού φίλτρου, στη δεύτερη φωτογραφία, το ανακλώμενο φως ανακόπτεται και εμφανίζεται η εικόνα.*

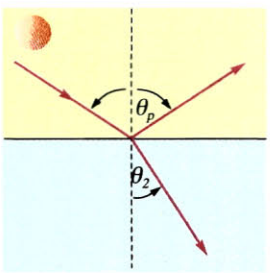
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1 - 3

Υπολογισμός γωνίας ολικής πόλωσης από ανάκλαση στην ήρεμη επιφάνεια μιας πισίνας: Το ηλιακό φως εν μέρει ανακλάται και εν μέρει διαθλάται από την ήρεμη επιφάνεια του νερού μιας πισίνας.

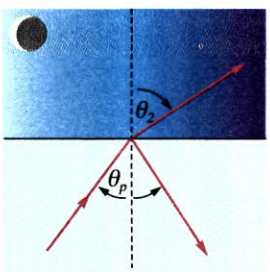
Το χλωριωμένο νερό της πισίνας έχει δείκτη διάθλασης $n_2=1,35$, ενώ ο αέρας $n_1=1$.

(α) Για ποια γωνία πρόσπτωσης το φως από ανάκλαση είναι ολικώς πολωμένο;

(β) Ποια είναι η γωνία διάθλασης του φωτός σ' αυτή την περίπτωση;



Ηλιακό φως την ημέρα



Φως προβολέων τη νύχτα

(γ) Αν το βράδυ η πισίνα φωτίζεται με προβολείς που είναι τοποθετημένοι στον πυθμένα της, ποιες είναι τότε οι τιμές των γωνιών των ερωτημάτων (α) και (β);

ΛΥΣΗ (α) Το φως προσπίπτει από τον αέρα στην επιφάνεια του νερού. Η γωνία ολικής πόλωσης δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{n_2}{n_1}=\frac{\eta\mu\,\theta_p}{\sigma\upsilon\nu\,\theta_p}=\varepsilon\varphi\,\theta_p \Rightarrow 1{,}35=\varepsilon\varphi\theta_p \Rightarrow \boldsymbol{\theta_p=53{,}5^o}$$

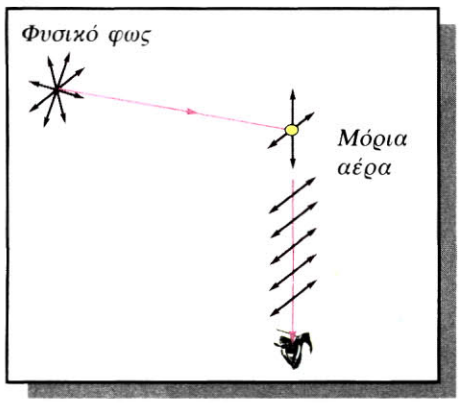
(β) $\theta_2+\theta_p=90^o \Rightarrow \theta_2+53{,}5^o=90^o \Rightarrow \boldsymbol{\theta_2=36{,}5^o}$

(γ) $\frac{n_1}{n_2}=\frac{\eta\mu\,\theta_p}{\sigma\upsilon\nu\,\theta_p}=\varepsilon\varphi\,\theta_p \Rightarrow \frac{1}{1{,}35}=\varepsilon\varphi\theta_p \Rightarrow \boldsymbol{\theta_p=36{,}5^o}$

$\theta_2+\theta_p=90^o \Rightarrow \theta_2+36{,}5^o=90^o \Rightarrow \boldsymbol{\theta_2=53{,}5^o}$

Παρατηρούμε ότι οι δύο γωνίες πόλωσης για τη διαχωριστική επιφάνεια νερού - αέρα είναι συμπληρωματικές.

Πόλωση από σκέδαση - Κυανό χρώμα του ουρανού



1-28 *Το φως που σκεδάζεται από μόρια του αέρα είναι μερικώς πολωμένο.*

Όταν το ορατό φως προσπίπτει σε ένα σύστημα σωματίων, απορροφάται από αυτά και επανεκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις χωρίς να αλλάζει η συχνότητα των διάφορων ακτινοβολιών του. Η απορρόφηση και η επανεκπομπή αυτή του φωτός ονομάζεται **σκέδαση**.

Επειδή το σκεδαζόμενο φως εκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις, βλέπουμε φως στον ουρανό, έστω κι αν δεν κοιτάμε κατευθείαν τον ηλιακό δίσκο. Μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε ότι το φως αυτό είναι μερικώς πολωμένο (σχήμα 1-28).

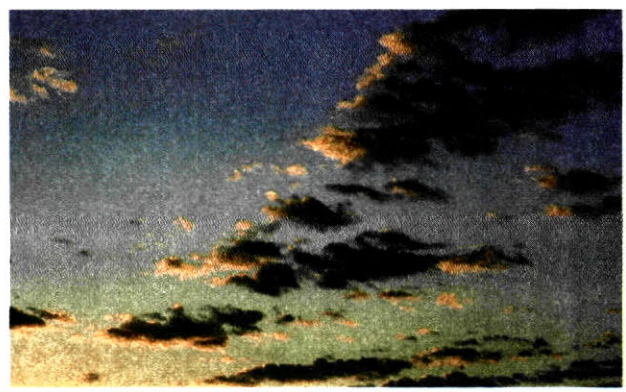
Αν πάρουμε ένα πλακίδιο τύπου polaroid και το τοποθετήσουμε έτσι, ώστε το επίπεδό του να είναι οριζόντιο, θα διαπιστώσουμε ότι για διαφορετικές γωνίες του επιπέδου πόλωσής του περνάει φως διαφορετικής έντασης.

Το πολωμένο φως που προέρχεται από σκέδαση έχει επίπεδο ταλάντωσης κάθετο προς το επίπεδο που ορίζεται από την αρχική ακτίνα και τη σκεδασθείσα ακτίνα.

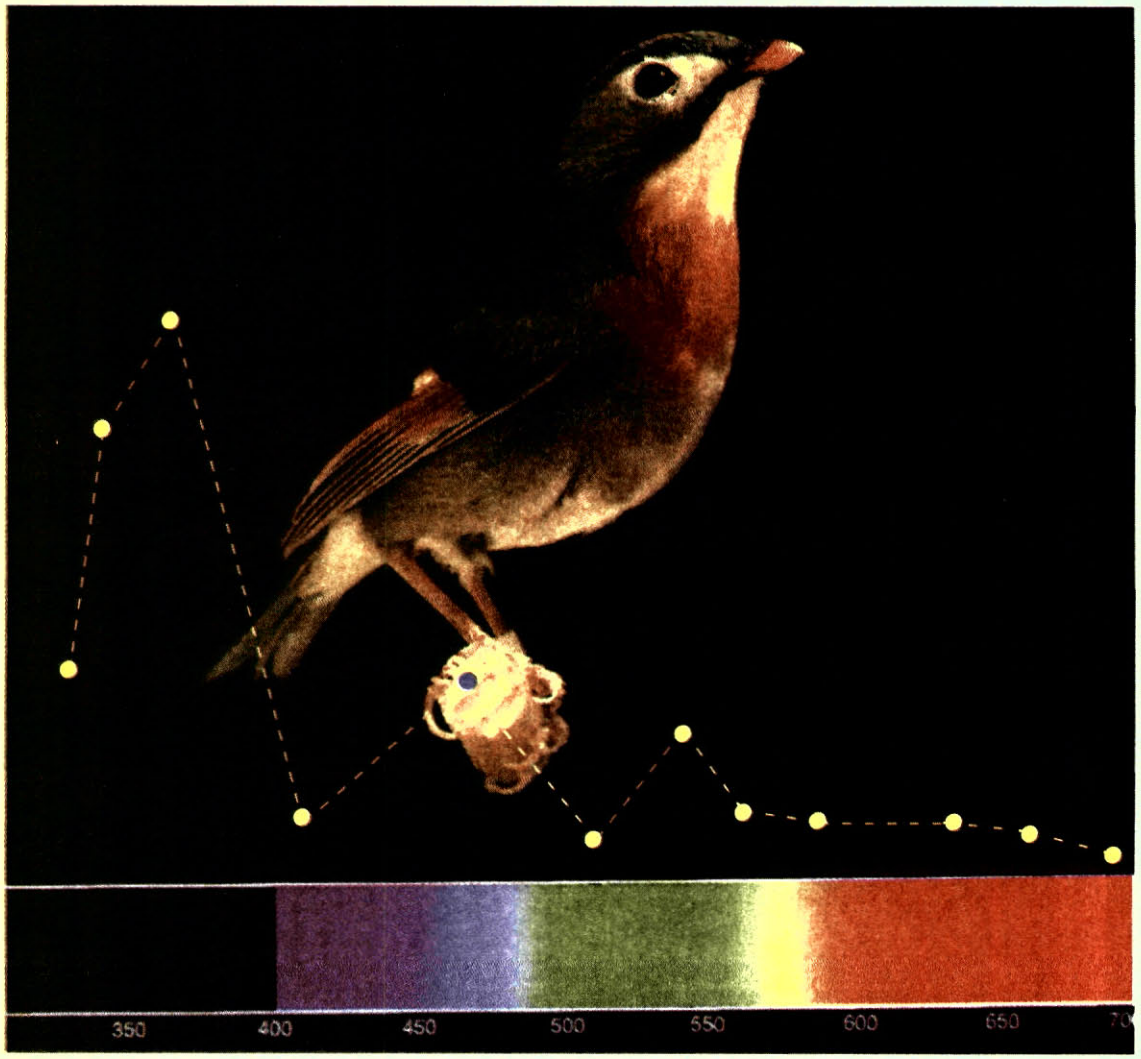
Το πόσο ισχυρό θα είναι το σκεδαζόμενο φως εξαρτάται από το μήκος κύματος κάθε μονοχρωματικής ακτινοβολίας. Δηλαδή οι ακτινοβολίες που έχουν μικρότερα μήκη κύματος σκεδάζονται περισσότερο. Επομένως τα μικρότερα μήκη κύματος του ορατού φάσματος του φωτός (κυανό) σκεδάζονται περισσότερο από τα μεγαλύτερα μήκη κύματος (ερυθρό). Σ' αυτό το φαινόμενο οφείλεται το κυανό χρώμα του ουρανού.

Το σκεδαζόμενο φως περιέχει κατά προσέγγιση εννιά φορές περισσότερο κυανό χρώμα από το αντίστοιχο ερυθρό.

Το φως που προσπίπτει σε ένα νέφος, χωρίς το κυανό χρώμα, όταν ανακλάται από το νέφος και γίνεται τελικά ορατό από τον παρατηρητή, έχει κίτρινη έως ερυθρή απόχρωση.



1-29 *Τα σύννεφα όπως φαίνονται κατά την ανατολή και τη δύση του Ήλιου.*



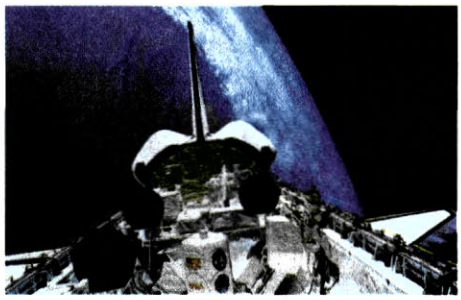
Η ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού όσον αφορά την αντίληψη των χρωμάτων κυμαίνεται από τα 400nm περίπου (ιώδες φως) έως τα 700nm περίπου (ερυθρό φως). Αυτή η ευαισθησία καθορίζεται κυρίως από τους υποδοχείς που υπάρχουν στα αισθητήρια όργανα της όρασης του ανθρώπου.

Το ερώτημα είναι αν και τα άλλα ζωικά είδη υπόκεινται σε παρόμοιους περιορισμούς της όρασής τους. Πιστεύεται πάντως ότι τα ημερόβια πουλιά διαθέτουν μηχανισμούς που τους επιτρέπουν να βλέπουν το υπεριώδες φως. Συγκεκριμένα, το «πουλί του Ήλιου» της παραπάνω εικόνας έχει ευαισθησία από τα 330nm (υπεριώδες φως) έως τα 680nm (ερυθρό φως).

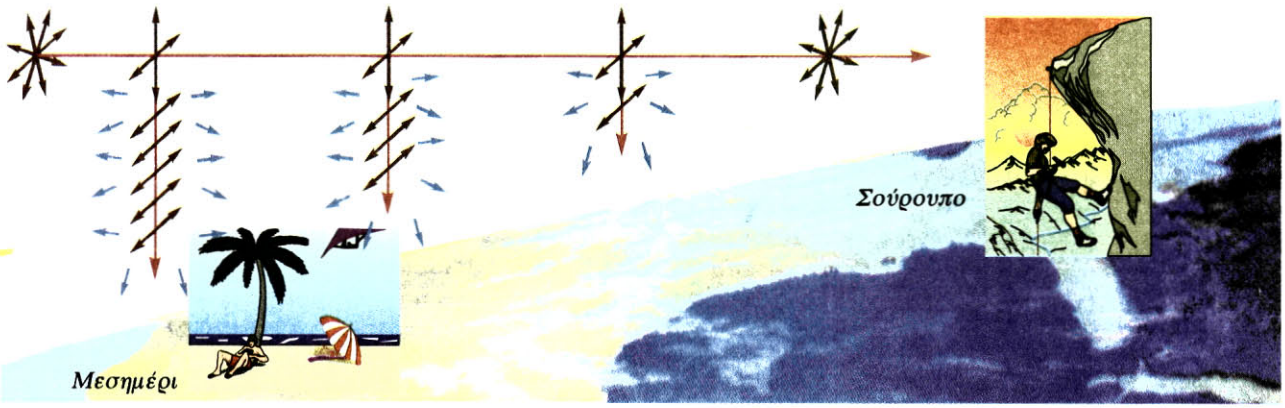
Κατά το σούρουπο το φως διανύει μεγάλη απόσταση μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα και ένα σημαντικό μέρος του κυανού χρώματος σκεδάζεται. Έτσι το φως που φθάνει κατευθείαν στα μάτια μας από τον ορίζοντα είναι φτωχό σε κυανό χρώμα.

Επίσης, όταν η ατμόσφαιρα είναι πλούσια σε υδρατμούς, αυτοί απορροφούν κυρίως το κυανό χρώμα. Έτσι έχουμε ενίσχυση της ερυθρής απόχρωσης του ουρανού.

Αν η Γη δεν είχε ατμόσφαιρα, δε θα μπορούσαμε να δούμε το χρώμα του ουρανού. Μαύρος θα ήταν την ημέρα, μαύρος και τη νύχτα. Οι αστροναύτες που βρίσκονται στο διάστημα βλέπουν μαύρο ουρανό, γιατί δεν υπάρχουν μόρια να σκεδάσουν το φως.



1-30 *Η Γη και ο μαύρος ουρανός όπως φαίνονται από το διαστημικό λεωφορείο Coloumbia. Φωτογραφία της NASA.*



1-31 *Δύο εικόνες την ίδια στιγμή σε δύο τόπους με διαφορά 8 ωρών. Στην πρώτη το φως που φθάνει στους λουόμενους από σκέδαση είναι πολωμένο και περιέχει περίσσεια κυανού χρώματος. Στη δεύτερη το αρχικά λευκό φως υφίσταται την απώλεια αυτού του κυανού χρώματος, καθώς διατρέχει την ατμόσφαιρα, και στον ορειβάτη φθάνει τελικά φως από το ερυθρό φάσμα του ορατού φωτός.*

Οπτικώς ενεργά σώματα.

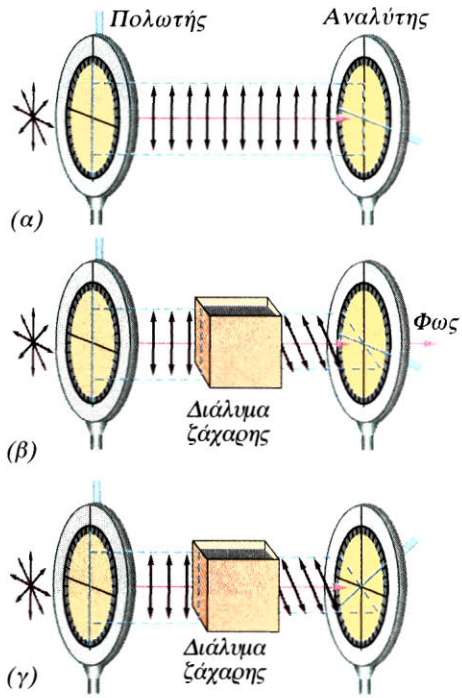
Στροφή του επιπέδου πόλωσης του φωτός

Υπάρχουν ορισμένα διαφανή σώματα που έχουν την ιδιότητα να στρέφουν το επίπεδο του πολωμένου φωτός, όταν αυτό περάσει από μέσα τους. Τα σώματα αυτά λέγονται **οπτικώς ενεργά**. Τέτοια είναι, για παράδειγμα, οι κρύσταλλοι χαλαζία, το διάλυμα ζάχαρης, το διάλυμα γαλακτικού οξέος κτλ.

Θεωρούμε πολωτή και αναλύτη (δεύτερο όμοιο πολωτή με τον πρώτο) διασταυρωμένους, ώστε η μονοχρωματική ακτίνα που προσπίπτει στον πολωτή να ανακόπτεται από τον αναλύτη (σχήμα 1-32α). Αν μεταξύ του πολωτή και του αναλύτη παρεμβάλουμε κρύσταλλο χαλαζία ή διάλυμα ζάχαρης, θα παρατηρήσουμε ότι από τον αναλύτη περνάει φως (1-32β). Αν στρίψουμε τον αναλύτη, τότε για ορισμένη γωνία το φως ανακόπτεται και πάλι (1-32γ).

Γίνεται φανερό ότι η παρεμβολή ενός οπτικά ενεργού σώματος έστρεψε το επίπεδο πόλωσης του πολωμένου φωτός κατά ορισμένη γωνία δεξιά ή αριστερά.

Διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της γωνίας στρέψης του πολωμένου φωτός ονομάζονται **πολωσίμετρα**.



1-32 *(α) Ο αναλύτης ανακόπτει το πολωμένο φως. (β) Το διάλυμα ζάχαρης προκαλεί στροφή του επιπέδου ταλάντωσης του πολωμένου φωτός. Από τον αναλύτη περνάει φως. (γ) Με στροφή του αναλύτη ανακόπτουμε πάλι το φως.*

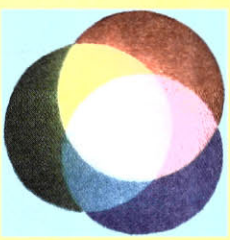
«Κατά βάθος τα πάντα είναι ζήτημα φωτός»...

Το φως και οι μεγάλοι ζωγράφοι. Το φως «ζωγραφίζεται» από τους ιμπρεσιονιστές ζωγράφους παράλληλα με τις πρώτες επιστημονικές παρατηρήσεις για τη φύση του (Γαλλία, μέσα του 18ου αιώνα). Στο πέρασμά του τα υλικά αντικείμενα διαλύονται και καταγράφεται η στιγμιαία εντύπωση (impression). Το φως αναλύεται στα χρωματικά συστατικά του. Έτσι το ίδιο θέμα μπορεί να ξαναζωγραφιστεί, αφού αλλάζει η χρωματικότητά του στο πέρασμα της ημέρας.

Κλοντ Μονέ (1840-1926), **«Ο καθεδρικός ναός της Ρουέν»** (1892-1893).

Ο ζωγράφος Ζορζ Σερά (1859-1891), φοιτητής ακόμα, διαβάζει τις παρατηρήσεις πάνω στα οπτικά φαινόμενα του φυσικού Σαρλ Ανρύ. Στη ζωγραφική του η εικόνα συντίθεται από πολλές μικρές χρωματικές κουκκίδες (point). Σε κάθε περιοχή βρίσκονται κουκκίδες διαφορετικών καθαρών χρωμάτων. Από ορισμένη απόσταση τα χρωματικά συστατικά αναμειγνύονται οπτικά στον αμφιβληστροειδή, διατηρώντας την ένταση και τη λάμψη που έχει το φως εκείνη τη στιγμή. Ο ζωγραφικός αυτός τρόπος ονομάστηκε «πουαντιγισμός».

Ζορζ Σερά, «**Κυριακάτικος περίπατος στην Γκραντ Ζατ**» (1884-1886).



Το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε ονομάζονται κύρια προσθετικά χρώματα του φωτός. Όταν συνδυάζονται κατάλληλα, μπορούν να δημιουργήσουν όλα τα χρώματα. Όταν συνδυάζονται ίδιες ποσότητες του κόκκινου, του πράσινου και του μπλε, το αποτέλεσμα είναι λευκό φως.

Απόσπασμα από το βιβλίο του Victor Weisskopf (Βίκτορ Βάισκοφ) *Η κβαντική επανάσταση.*

ΓΙΑΤΙ Ο ΟΥΡΑΝΟΣ ΕΙΝΑΙ ΓΑΛΑΝΟΣ;

... η κβαντική θεωρία δεν είναι καθόλου απομακρυσμένη από τις ενασχολήσεις μας, αγγίζει τον ίδιο τον κόσμο όπου ζούμε και επιτρέπει να κατανοήσουμε τις πιο λεπτές δομές της ύλης. Καλώς ή κακώς, μας έχει παράσχει τη δυνατότητα ελέγχου μερικών ενεργειακών διαδικασιών από τις πιο ισχυρές του σύμπαντος.

Εντούτοις θα ήθελα να προσθέσω στην επιχειρηματολογία μου ένα επιπλέον στοιχείο, το οποίο είμαι βέβαιος ότι θα δείξει πως η κβαντική θεωρία της αλληλεπίδρασης του φωτός με την ύλη επιτρέπει να απαντήσουμε σε ερωτήσεις πολύ συνηθισμένες, του τύπου:

Γιατί ο ουρανός είναι γαλανός;
Γιατί το νερό είναι διαφανές;
Τι είναι αυτό που κάνει το αντικείμενο να φαίνεται χρωματιστό;
Ή ακόμη, γιατί το μέταλλο είναι στιλπνό;

Ο αναγνώστης θα μου επιτρέψει να μη θίξω παρά μόνο την περίπτωση του γαλανού ουρανού, για να αποφύγω μια περίπλοκη παρουσίαση, που, ακόμη και στη μοναδική αυτή περίπτωση, θα παραμείνει σχηματική. Πώς η κβαντική θεωρία εξηγεί την απορρόφηση του φωτός από ένα σώμα, με άλλα λόγια, από ένα άτομο ή ένα μόριο;

Ας φανταστούμε ένα άτομο ή ένα μόριο βυθισμένο στο πεδίο ενός φωτεινού κύματος σαφώς καθορισμένου χρώματος. Με κβαντικούς όρους, ένα τέτοιο κύμα περιγράφεται ως ένα σύνολο φωτονίων που έχουν όλα την ίδια ενέργεια hf, η συχνότητα f αντιστοιχεί στο χρώμα του εν λόγω φωτός. Όσο για το άτομο, η κβαντική θεωρία το περιγράφει ως ένα σύστημα του οποίου η ενέργεια είναι κβαντωμένη, δηλαδή παρουσιάζει μια αλληλουχία ενεργειακών επιπέδων, διαχωρισμένων μεταξύ τους: η ενέργεια ενός ατόμου δεν μπορεί να λάβει παρά ορισμένες τιμές, τις τιμές αυτών των επιπέδων, οι οποίες είναι χαρακτηριστικές γι' αυτό το άτομο ή, ακριβέστερα, για το είδος στο οποίο ανήκει (άνθρακας, άζωτο κτλ.).

Στην κανονική κατάσταση, που ονομάζεται μη διεγερμένη, το άτομο βρίσκεται σ' αυτήν από τις επιτρεπόμενες καταστάσεις που χαρακτηρίζεται από την ελάχιστη ενέργεια. Λέμε ότι βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάστασή του. Όταν δέχεται φωτεινή ενέργεια, που μεταφέρουν τα φωτόνια συχνότητας f, μπορεί να περάσει σε μια ανώτερη ενεργειακή κατάσταση, υπό τον όρο πάντοτε η ενέργεια των φωτονίων hf να είναι ακριβώς ίση με τη διαφορά μεταξύ ενός από τα επιτρεπόμενα ενεργειακά επίπεδα και του θεμελιώδους.

Αν είναι έτσι τα πράγματα, το άτομο απορροφά ένα φωτόνιο, το οποίο εξαφανίζεται από την προσπίπτουσα δέσμη, και οδηγείται σε μια ανώτερη ενεργειακή κατάσταση. Ονομάζουμε αυτές τις απορροφήσεις «συντονισμένες απορροφήσεις» ή απλώς «συντονισμούς».

Θα εισαγάγω τώρα, για άλλη μία φορά, ένα μοντέλο εύχρηστο για την περιγραφή του ατόμου. Ας φανταστούμε τα ηλεκτρόνιά του ως μικρούς ταλαντωτές, ικανούς να πάλλονται υπό την επίδραση ενός ηλεκτρομαγνήτικού κύματος και των οποίων οι ιδιοσυχνότητες (δηλαδή οι συχνότητες για τις οποίες το ηλεκτρόνιο συντονίζεται παλλόμενο με μέγιστο πλάτος) αντιστοιχούν σε μεταβάσεις του ατόμου από τη θεμελιώδη κατάσταση σε μια από τις διεγερμένες. Με άλλα λόγια, οι ιδιοσυχνότητες του ταλαντωτή, που μας χρησιμεύει ως μοντέλο του ατόμου, είναι ίσες με τις συχνότητες του κβαντικού συντονισμού.

Ας εξετάσουμε την επίδραση του φωτός στα άτομα μέσω του παραπάνω μοντέλου. Μπορούμε στο εξής να αγνοήσουμε τα φωτόνια και τις κβαντικές καταστάσεις του ατόμου: αυτό το μοντέλο επιτρέπει πράγματι να θεωρήσουμε το φως ως ένα κλασικό ηλεκτρομαγνητικό κύμα, που επιδρά σε κλασικούς ταλαντωτές, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από τις ιδιοσυχνότητές τους. Υπό την επίδραση ενός

φωτεινού κύματος ο ταλαντωτής αρχίζει να πάλλεται. Η απόκριση του ταλαντωτή είναι ασήμαντη (αλλά μη μηδενική), όταν η συχνότητα του προσπίπτοντος κύματος είναι διαφορετική από τις ιδιοσυχνότητές του, ενώ αντίθετα γίνεται πολύ σημαντική, όταν οι συχνότητες του κύματος και του ταλαντωτή συμπίπτουν, όταν έχουμε συντονισμό.

Ποιες είναι λοιπόν οι συχνότητες συντονισμού των διάφορων ατόμων και μορίων; Για την πλειονότητα των απλών ατόμων (O, N, H) είναι αρκετά υψηλότερες από αυτές που χαρακτηρίζουν το ορατό φως. Ανήκουν στην περιοχή του φάσματος η οποία ονομάζεται υπεριώδης. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο ένα αέριο είναι διαφανές.

Για τα μόρια (O_2, N_2, H_2O) οι συχνότητες συντονισμού είναι χαμηλότερες από τις ορατές συχνότητες του υπερύθρου και μέσα στο υπεριώδες, άρα, και σ' αυτή την περίπτωση, βρίσκονται έξω από το ορατό φάσμα. Υπάρχει όμως μια σημαντική διαφορά: στην περίπτωση των ατόμων οι μάζες που ταλαντώνονται είναι αυτές των ηλεκτρονίων. Στην περίπτωση των μορίων, οι μάζες που ταλαντώνονται είναι αυτές των ατόμων και συνεπώς είναι πολύ βαρύτερες από ό,τι στην πρώτη περίπτωση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα και το αυτό κύμα να θέτει πολύ ευκολότερα σε κίνηση τους ταλαντωτές που αντιστοιχούν σε άτομα από ό,τι εκείνους που αντιστοιχούν σε μόρια (*).

Τώρα λοιπόν μπορούμε να κατανοήσουμε ένα από τα ωραιότερα χρώματα της φύσης: το γαλανό του ουρανού. Το ηλιακό φως αποτελείται, όπως είναι γνωστό, από ένα σύνολο ακτινοβολιών που περιλαμβάνει όλες τις δυνατές συχνότητες του φάσματος, από το υπεριώδες έως το υπέρυθρο, μέσω του ορατού. Ας εξετάσουμε την επίδραση αυτών των ποικίλων ακτινοβολιών στους ταλαντωτές που απαρτίζουν τα άτομα και τα μόρια μέσα στην ατμόσφαιρα. Οι υπέρυθρες ακτινοβολίες προκαλούν το συντονισμό των μορίων, αλλά τα αντίστοιχα πλάτη είναι μικρά, όπως μόλις αναφέρθηκε. Αντίθετα οι υπεριώδεις ακτινοβολίες προκαλούν το συντονισμό των ατόμων και τα αντίστοιχα πλάτη είναι σημαντικά. Όσο για το ορατό φως, θέτει σε κίνηση τους ταλαντωτές με ένα πλάτος ταλάντωσης σχετικά μικρό, αλλά το ίδιο για όλους, αφού οι ταλαντωτές που περιλαμβάνονται δε συντονίζονται στο ορατό. Συνολικά, το ηλιακό φως προκαλεί ταλαντώσεις μέσου ή μικρού πλάτους στο ορατό, αμελητέου στο υπέρυθρο και πολύ μεγάλου στο υπεριώδες.

Επιπλέον πρέπει να λάβουμε υπόψη μας ότι ένα ταλαντούμενο φορτίο, όπως συμβαίνει να είναι το ηλεκτρόνιο ενός ατόμου που εξαναγκάζεται σε ταλάντωση, είναι επίσης πομπός φωτός. Εδώ έχουμε ένα από τα θεμελιώδη συμπεράσματα της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας του Maxwell. Ένα ταλαντούμενο ηλεκτρόνιο εκπέμπει προς όλες τις κατευθύνσεις ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα (με άλλα λόγια, φως), του οποίου η συχνότητα είναι ίση με την ιδιοσυχνότητα της ταλάντωσής του, αυτό που ονομάζεται σκέδαση Rayleigh. Εξάλλου αποδεικνύεται ότι η ένταση της εν λόγω εκπομπής είναι ανάλογη με την τέταρτη δύναμη αυτής της συχνότητας.

Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι τα μόρια του αέρα που φωτίζονται από τον Ήλιο εκπέμπουν φως και ακόμη ότι αυτή η εκπομπή είναι εντονότερη στο κυανό από ό,τι στο ερυθρό, αφού η συχνότητα του κυανού φωτός είναι περίπου διπλάσια από εκείνη του ερυθρού. Έτσι, όταν βλέπουμε τον ουρανό, χωρίς να κοιτάμε τον ηλιακό δίσκο, τον βλέπουμε γαλανό: είναι το αποτέλεσμα της δύναμης του 4.

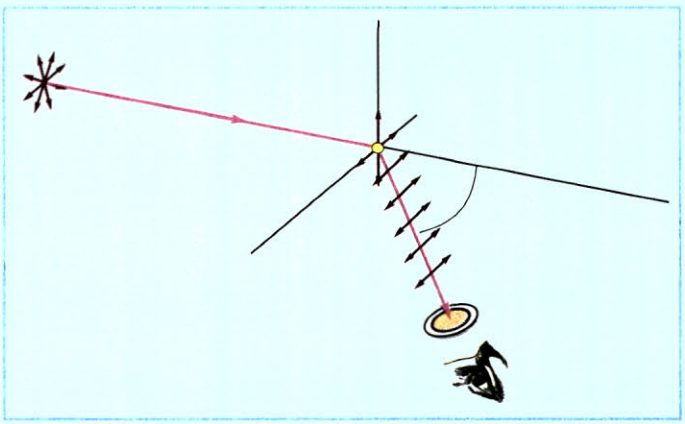
(*) Σημείωση συγγραφέων: Αυτό σημαίνει ότι το πλάτος ταλάντωσης των δομικών μονάδων των μορίων (άτομα) είναι μικρότερο από το πλάτος ταλάντωσης των ατομικών ταλαντωτών (ηλεκτρόνια) στην περίπτωση του συντονισμού.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

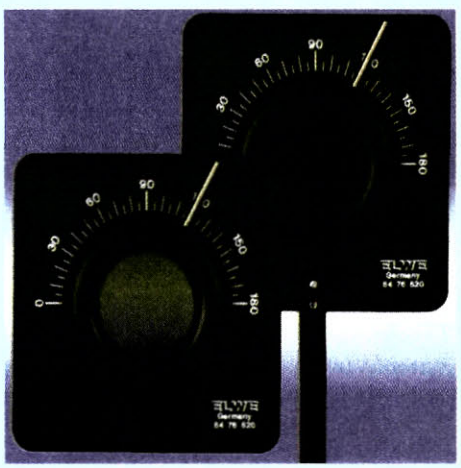
ΠΟΛΩΣΗ ΑΠΟ ΣΚΕΔΑΣΗ

Ο σκοπός της δραστηριότητας αυτής είναι να διαπιστώσουμε ότι το φως που προέρχεται από τον ουρανό είναι μερικώς πολωμένο.

Μια ηλιόλουστη, ανέφελη μέρα κοιτάξτε το γαλανό ουρανό πίσω από ένα φύλλο polaroid, που το κρατάτε κοντά στο ένα μάτι, ώστε να βλέπετε ένα μεγάλο τμήμα του ουρανού. Κατευθύνετε στη συνέχεια το polaroid, ώστε να βλέπετε μια περιοχή του ουρανού με ένα ελάχιστο της έντασης του φωτός. Το φως που φτάνει στο μάτι σας από αυτό το τμήμα του ουρανού είναι ισχυρά πολωμένο.



Μετρήστε στο περίπου τη γωνία που σχηματίζεται από τη γραμμή που συνδέει το κεφάλι σας και την περιοχή του ουρανού με το φως μέγιστης πόλωσης, καθώς και τη γραμμή που συνδέει τον Ήλιο με την ίδια περιοχή του ουρανού, δηλαδή τη γωνία θ. Θα πρέπει να βρείτε γωνία κοντά στις 90°.



Μπορείτε να μετρήσετε επίσης την κατεύθυνση του άξονα της πόλωσης του φωτός που φτάνει στα μάτια σας από την περιοχή του ουρανού με μέγιστη πόλωση. Αυτή την κατεύθυνση σας τη φανερώνει ο οπτικός άξονας του φύλλου polaroid που χρησιμοποιείτε. Αρκεί επομένως να γνωρίζετε τον οπτικό άξονα του polaroid σας.

Αν δεν τη γνωρίζετε, μπορείτε να τη βρείτε κοιτάζοντας μία φωτεινή πηγή γνωστής πόλωσης, π.χ. το φως που ανακλάται από ένα τζάμι ή από ένα γυαλιστερό πάτωμα. Όπως γνωρίζουμε, το ανακλώμενο φως είναι πολωμένο παράλληλα προς την επιφάνεια ανάκλασης, π.χ. το γυαλιστερό μαρμάρινο πάτωμα.

ΣΥΝΟΨΗ 1ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

❑ Το φως έχει διπλή φύση. Συμπεριφέρεται ως κύμα και ως σωμάτιο που ονομάζεται φωτόνιο. Σε φαινόμενα όπως η συμβολή, η περίθλαση και η πόλωση εκδηλώνεται η κυματική φύση του φωτός (ηλεκτρομαγνητικό κύμα), ενώ σε φαινόμενα που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση του φωτός με την ύλη (απορρόφηση - εκπομπή), όπως το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, εκδηλώνεται η σωματιδιακή φύση του φωτός.

❑ Σύμφωνα με τη θεωρία του Maxwell, το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία ξεκινούν από τη φωτεινή πηγή και διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις.

❑ Σύμφωνα με την κβαντική θεωρία του Planck, το φως (και γενικότερα κάθε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) εκπέμπεται και απορροφάται από τα άτομα της ύλης όχι κατά συνεχή τρόπο αλλά **ασυνεχώς**. Δηλαδή κάθε άτομο εκπέμπει ή απορροφά στοιχειώδη ποσά ενέργειας, που ονομάζονται κβάντα φωτός ή φωτόνια.

❑ Το φως, όπως και κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα, διαδίδεται στο κενό με σταθερή ταχύτητα περίπου $3x10^8$m/s. Η τιμή της ταχύτητας του φωτός στο κενό είναι μια θεμελιώδης σταθερά της φύσης.

❑ Το πηλίκο της ταχύτητας c_0 του φωτός στο κενό προς την ταχύτητα c μέσα σε κάποιο υλικό ονομάζεται ***δείκτης διάθλασης*** n του υλικού μέσου. Ισχύει δηλαδή:

$$n = \frac{\text{ταχύτητα του φωτός στο κενό}}{\text{ταχύτητα του φωτός στο μέσο}} = \frac{c_0}{c}$$

❑ Σε ένα υλικό οπτικό μέσο η ταχύτητα του φωτός είναι διαφορετική για διαφορετικά μήκη κύματος. Ο δείκτης διάθλασης του μέσου δεν είναι σταθερός, αλλά εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτός. Το φαινόμενο αυτό, δηλαδή η εξάρτηση της ταχύτητας του κύματος και του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος, ονομάζεται διασκεδασμός.

❑ Το ορατό φως έχει όρια και τα χρώματά του έχουν μήκη κύματος που κυμαίνονται μεταξύ 400nm του ιώδους και 700nm του ερυθρού. Εκτός από την ακτινοβολία της ορατής περιοχής του φάσματος υπάρχει και ακτινοβολία αόρατη, η οποία βρίσκεται πέρα από την ιώδη περιοχή, με μήκη κύματος μικρότερα των 400nm. Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται υπεριώδης ακτινοβολία. Μετά την ερυθρή περιοχή του φάσματος υπάρχει αόρατη ακτινοβολία με μήκη κύματος μεγαλύτερα των 700nm, η οποία προκαλεί έντονη αύξηση της θερμοκρασίας των στερεών και υγρών σωμάτων. Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται υπέρυθρη ακτινοβολία.

❑ Το φυσικό φως είναι σύνθεση πολλών κυμάτων με διάφορα επίπεδα ταλάντωσης των ηλεκτρικών τους πεδίων και τυχαίες διευθύνσεις διάδοσης. Το φυσικό φως που δεχόμαστε απευθείας από μία φωτεινή πηγή, επειδή προέρχεται από πολλά άτομα ή μόρια, έχει πολλά επίπεδα ταλάντωσης και συνεπώς δεν είναι πολωμένο.

❑ Για την πόλωση του φυσικού φωτός χρησιμοποιούμε ειδικά πολωτικά φίλτρα. Μετά τη χρήση του φίλτρου το επίπεδο ταλάντωσης του κύματος είναι αυτό που καθορίζεται από το υλικό του φίλτρου. Η συσκευή που περιέχει το πολωτικό φίλτρο ονομάζεται πολωτής.

❑ Η γωνία ολικής πόλωσης του φωτός, για κάθε μέσο, είναι εκείνη η γωνία πρόσπτωσης για την οποία η ανακλώμενη ακτίνα και η διαθλώμενη είναι κάθετες μεταξύ τους. Τα γυαλιά ηλίου που διαθέτουν απορροφητικό φίλτρο polaroid έχουν τέτοια κατασκευή, ώστε το χαρακτηριστικό επίπεδο πόλωσής τους να είναι κατακόρυφο και να απορροφούν στο μέγιστο δυνατό την οριζόντια συνιστώσα του ανακλώμενου φωτός. Έτσι στα μάτια φτάνει ένα μικρό ποσοστό του πολωμένου φωτός.

❑ Όταν το ορατό φως προσπίπτει σε ένα σύστημα σωματίων, απορροφάται από αυτά και επανεκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις, χωρίς να αλλάζει η συχνότητα των διάφορων ακτινοβολιών του. Η απορρόφηση και η επανεκπομπή αυτή του φωτός ονομάζεται σκέδαση.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Οι αστρονόμοι ισχυρίζονται ότι η σημερινή εικόνα ενός γαλαξία στο τηλεσκόπιο αφορά κάποια στιγμή του παρελθόντος του. Πώς εξηγείτε αυτό τον ισχυρισμό;

2. Τι είναι το φως σύμφωνα με τη θεωρία του Maxwell;

3. Πώς ερμηνεύει η κβαντική θεωρία του Planck την εκπομπή και την απορρόφηση του φωτός;

4. Εξηγήστε γιατί, όταν φως διαπερνά μία διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών μέσων, η συχνότητά του παραμένει αμετάβλητη.

5. Εξηγήστε γιατί το μήκος κύματος μίας μονοχρωματικής ακτινοβολίας, που διαδίδεται σε δύο οπτικά υλικά μέσα, έχει μικρότερη τιμή στο πυκνότερο μέσο σε σχέση με αυτήν που έχει στο αραιότερο.

6. Όταν το φως μεταβαίνει από ένα μέσο σε κάποιο άλλο δεν μεταβάλλονται:

α. το μήκος κύματος και η ταχύτητά του.

β. η συχνότητα και το μήκος κύματός του.

γ. η ταχύτητά του και η ενέργεια των φωτονίων.

δ. η ενέργεια των φωτονίων και η συχνότητά του.

7. Σημειώστε με Σ ή Λ όποιες από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστές ή λάθος αντίστοιχα:

α. Το φως διαδίδεται σε όλα τα οπτικά υλικά μέσα με ταχύτητα περίπου $3x10^8$m/s.

β. Το φως διαδίδεται στο κενό με ταχύτητα περίπου $3x10^8$m/s.

γ. Η ταχύτητα του φωτός μικραίνει, όταν το φως περνά από πυκνότερο σε αραιότερο οπτικό υλικό μέσο.

δ. Η ταχύτητα του φωτός μικραίνει, όταν το φως περνά από αραιότερο σε πυκνότερο οπτικό υλικό μέσο.

8. Ποιο φαινόμενο ονομάζεται διασκεδασμός του φωτός;

9. Κατά την ανάλυση του λευκού φωτός παίρνουμε μία ταινία με διάφορα χρώματα. Μπορείτε να εξηγήσετε γιατί συμβαίνει αυτό;

10. Φως μεγαλύτερου μήκους κύματος (ερυθρό) έχει μεγαλύτερη ταχύτητα σε ένα μέσο από φως μικρότερου μήκους κύματος (ιώδες); Να εξηγήσετε πως διαπιστώνουμε αυτό το γεγονός.

11. Δύο μονοχρωματικές ακτίνες φωτός, η κόκκινη και η κίτρινη, εκτρέπονται από γυάλινο πρίσμα. Ποιες από τις προτάσεις που ακολουθούν είναι σωστές;

α. Η γωνία εκτροπής της κόκκινης είναι μικρότερη από την αντίστοιχη της κίτρινης.

β. Η γωνία εκτροπής της κόκκινης είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της κίτρινης.

γ. Η κόκκινη ακτίνα διαδίδεται στο γυαλί με μεγαλύτερη ταχύτητα από ό,τι η κίτρινη.

δ. Η κόκκινη και η κίτρινη ακτίνα διαδίδονται στο γυαλί με την ίδια ταχύτητα.

12. Οι δείκτες διάθλασης ενός τυπικού γυαλιού, που ακολουθούν, αντιστοιχούν σε καθένα από τα χρώματα. Να κάνετε την αντιστοιχία χρώματος - δείκτη διάθλασης.

Ιώδης	1,530
Μπλέ	1,520
Πράσινο	1,517
Κίτρινο	1,512
Πορτοκαλί	1,525
Κόκκινο	1,508

13. Ποια είναι τα χαρακτηριστικά του φωτός σε σχέση με τη διάδοσή του σε οπτικά μέσα;

14. Η γωνία εκτροπής κάθε χρώματος, όταν αυτό διέρχεται από πρίσμα:

α. είναι τόσο μικρότερη, όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος του χρώματος.

β. είναι τόσο μικρότερη όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος του χρώματος.

γ. δεν εξαρτάται από το μήκος κύματος του χρώματος.

δ. είναι ίδια για όλα τα χρώματα.

15. Ο δείκτης διάθλασης ενός οπτικού μέσου:

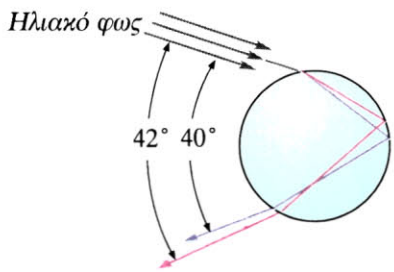
α. είναι ίδιος για όλα τα χρώματα.

β. αυξάνεται όσο αυξάνεται το μήκος κύματος του χρώματος.

γ. ελαττώνεται όσο αυξάνεται το μήκος κύματος του χρώματος.

δ. είναι χαρακτηριστικό μόνο του υλικού του οπτικού μέσου.

16. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε το ηλιακό φως να προσπίπτει σε σταγόνα βροχής. Ποια φαινόμενα παρατηρούνται κατά την πορεία των ακτίνων;



17. Το χρώμα του ουρανού είναι μπλε, γιατί...

α. τα μόρια του αέρα είναι μπλε.

β. η ίριδα των ματιών μας είναι μπλε.

γ. η σκέδαση του φωτός είναι εντονότερη στα μικρά μήκη κύματος.

δ. η σκέδαση του φωτός είναι εντονότερη στα μεγάλα μήκη κύματος.

Ποια από τις παραπάνω προτάσεις είναι η σωστή;

18. Τι είναι τα πολωτικά φίλτρα ή πολωτές;

19. Χρησιμοποιούμε γυαλιά τύπου polaroid, για να «κόψουμε», όσο το δυνατόν, την αντηλιά (έντονη ανάκλαση) του φωτός που προκαλούν λείες επιφάνειες, όταν το φως προσπίπτει σ' αυτές (λόγου χάρη στην επιφάνεια της θάλασσας, όταν επικρατεί μπονάτσα).

Ποια πρέπει να είναι η διεύθυνση της πόλωσης του υλικού polaroid, για να είναι τα γυαλιά αποτελεσματικά;

20. Να αναφέρετε τρεις τουλάχιστον ιδιότητες της υπεριώδους ακτινοβολίας οι οποίες μας πληροφορούν για την ύπαρξή της.

21. Με ποιο τρόπο αντιλαμβανόμαστε ότι πέρα από την ερυθρή περιοχή του φάσματος του ορατού φωτός υπάρχει αόρατη υπέρυθρη ακτινοβολία;

22. Πώς ονομάζονται τα όργανα με τα οποία ανιχνεύεται η υπέρυθρη ακτινοβολία και σε ποια αρχή βασίζεται η λειτουργία τους;

23. Τι ονομάζουμε φυσικό και τι γραμμικά πολωμένο φως;

24. Γιατί οι αστροναύτες, όταν βρίσκονται στη Σελήνη, βλέπουν μαύρο τον ουρανό;

25. Μπορούμε με έναν πολωτή να αντιληφθούμε ότι το φως κάποιας πηγής που φθάνει στα μάτια μας είναι πολωμένο ή όχι; Μήπως είναι απαραίτητο να έχουμε δύο όμοιους πολωτές; Εξηγήστε γιατί.

26. Τι ονομάζουμε γωνία ολικής πόλωσης; Να γράψετε το νόμο του Brewster.

27. Το φως του ουρανού είναι:

α. μερικώς πολωμένο,

β. μόνο γραμμικά πολωμένο,

γ. μη πολωμένο.

ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Για την επίλυση των προβλημάτων να θεωρηθούν γνωστά: σταθερά του Planck $6{,}63 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{J \cdot s}$, *ταχύτητα του φωτός στον αέρα* $3 \cdot 10^{8}\,\mathrm{m/s}$.

1. Σε ένα πείραμα μέτρησης της ταχύτητας του φωτός με τη μέθοδο του Fizeau η απόσταση μεταξύ της φωτεινής πηγής και του κατόπτρου είναι 12945m και ο τροχός έχει 720 διάκενα.

Να υπολογίσετε την ελάχιστη συχνότητα περιστροφής του τροχού αυτού, αν η πειραματική ταχύτητα του φωτός που προέκυψε ήταν $2{,}982 \times 10^{8}$m/s.

2. Μία δέσμη φωτός που διαδίδεται στο κενό έχει μήκος κύματος 600nm:

α. Να υπολογίσετε την ταχύτητα διάδοσης αυτής της δέσμης σε γυαλί με δείκτη διάθλασης 1,6.

β. Ποια τιμή έχει το μήκος κύματος της δέσμης, όταν αυτή διαδίδεται στο γυαλί; Δίνεται ότι η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι 300000km/s.

3. Μονοχρωματική ακτίνα φωτός ορισμένης συχνότητας έχει μήκος κύματος 500nm, όταν διαδίδεται στο νερό. Να υπολογιστεί το μήκος κύματος αυτού του φωτός, όταν διαδίδεται στο βενζόλιο. Οι δείκες διάθλασης του νερού και του βενζολίου είναι αντίστοιχα 1,333 και 1,501.

4. Φως έχει μήκος κύματος 560nm στο κενό. Όταν διαδίδεται στο νερό, έχει ταχύτητα $2{,}25 \times 10^{8}$ m/s. Αν το φως αυτό διαδιδόταν στο νερό, ποιο θα ήταν τότε το μήκος κύματός του;

5. Φως που διαδίδεται στο κενό έχει μήκος κύματος λ_0. Όταν το ίδιο φως διαδίδεται στην αιθανόλη, έχει μήκος κύματος 440nm και στη γλυκερίνη 405nm. Ποιος είναι ο λόγος του δείκτη διάθλασης της αιθανόλης προς το δείκτη διάθλασης της γλυκερίνης σε μήκος κύματος λ_0;

6. Φυσικό φως που διαδίδεται στον αέρα συναντά λεία επιφάνεια πάγου. Η ανακλώμενη ακτίνα βρέθηκε ολικώς πολωμένη. Να προσδιορίσετε τη γωνία πρόσπτωσης. Ο δείκτης διάθλασης του πάγου είναι 1,309.

7. Μονοχρωματική δέσμη φωτός που διαδίδεται στο νερό προσπίπτει σε γυάλινο κύβο, ο οποίος είναι βυθισμένος εξ ολοκλήρου στο νερό, υπό γωνία πρόσπτωσης 50°. Ένα μέρος της δέσμης ανακλάται, ενώ το άλλο διαθλάται. Αν η γωνία διάθλασης και η γωνία ανάκλασης έχουν άθροισμα 90°, να υπολογίσετε το δείκτη διάθλασης του γυάλινου κύβου για το φως αυτό, αν ο δείκτης διάθλασης του νερού είναι 1,333.

8. Μονοχρωματική δέσμη φυσικού φωτός που διαδίδεται στον αέρα προσπίπτει στη λεία επιφάνεια ενός κρυστάλλου χαλαζία υπό γωνία 57° (ως προς την κάθετο στο σημείο πρόσπτωσης). Η ανακλώμενη δέσμη βρέθηκε ότι είναι ολικώς πολωμένη:

α. Πόσος είναι ο δείκτης διάθλασης του χαλαζία;

β. Πόση είναι η γωνία διάθλασης;

9. Ένας ραδιοφωνικός σταθμός εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας 100MHz.

α. Πόση είναι η ενέργεια ενός φωτονίου αυτής της ακτινοβολίας;

β. Να συγκρίνετε το αποτέλεσμα με την ενέργεια κάποιας ορατής ακτινοβολίας π.χ. του κίτρινου φωτός, μήκους κύματος 600nm στο κενό.

γ. Να βρείτε τον αριθμό των φωτονίων που εκπέμπονται ανά δευτερόλεπτο, αν η ισχύς που ακτινοβολείται είναι 6,63 kW.

10. Αν υποθέσουμε ότι το ανθρώπινο μάτι μπορεί να αισθανθεί φως μήκους κύματος $\lambda = 600$nm όταν προσπίπτουν σ' αυτό τουλάχιστον 100 φωτόνια ανά δευτερόλεπτο, να υπολογίσετε:

α. τη συχνότητα του κύματος. β. την ολική ενέργεια ανά δευτερόλεπτο που δέχεται το μάτι.

11. Μονοχρωματικό φως μήκους κύματος $\lambda_0 = 600$nm, που διαδίδεται στον αέρα εισέρχεται ταυτόχρονα σε δύο οπτικά υλικά πάχους 1m, κάθετα στην διαχωριστική επιφάνεια του κάθε υλικού με τον αέρα. Οι δείκτες διάθλασης των δύο υλικών είναι $n_1 = 1{,}5$ και $n_2 = 1{,}2$. Να βρείτε:

α. τη χρονική διαφορά εξόδου του φωτός από τα δύο οπτικά υλικά.

β. τον αριθμό των μηκών κύματος του φωτός σε κάθε οπτικό υλικό.

12. Ακτινοβολία συχνότητας 10^{12} Hz απορροφάται πλήρως από μία ποσότητα νερού, οπότε αυξάνεται η θερμοκρασία του νερού κατά 2° C. Αν γνωρίζετε ότι για να αυξηθεί η θερμοκρασία της παραπάνω ποσότητας κατά 1° C απαιτείται ενέργεια 21216J, πόσα φωτόνια της ακτινοβολίας απορροφώνται;

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1
ΤΟ ΦΩΣ
ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Οι αστρονόμοι ισχυρίζονται ότι η σημερινή εικόνα ενός γαλαξία στο τηλεσκόπιο αφορά κάποια στιγμή του παρελθόντος του. Πώς εξηγείτε αυτό τον ισχυρισμό;

Απάντηση: Το φως διαδίδεται στο κενό με ταχύτητα $3x10^8$m/s. Αυτό σημαίνει ότι η εικόνα ενός γαλαξία διαδίδεται στο διάστημα με την ταχύτητα του φωτός. Παρ' όλο που η ταχύτητα του φωτός είναι πολύ μεγάλη, οι αποστάσεις των γαλαξιών είναι τόσο μεγάλες, ώστε το φως που προέρχεται από τους γαλαξίες να κάνει αρκετά χρόνια να φτάσει στα τηλεσκόπιά μας.

2. Τι είναι το φως σύμφωνα με τη θεωρία του Maxwell;

Απάντηση: Σύμφωνα με τη θεωρία του Maxwell, το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία ξεκινούν από τη φωτεινή πηγή και διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις.

3. Πώς ερμηνεύει η κβαντική θεωρία του Planck την εκπομπή και την απορρόφηση του φωτός;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 15.

4. Εξηγήστε γιατί, όταν φως διαπερνά μία διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών μέσων, η συχνότητά του παραμένει αμετάβλητη.

Απάντηση: Βλ. σελίδα 18.

5. Εξηγήστε γιατί το μήκος κύματος μίας μονοχρωματικής ακτινοβολίας, που διαδίδεται σε δύο οπτικά υλικά μέσα, έχει μικρότερη τιμή στο πυκνότερο μέσο σε σχέση με αυτήν που έχει στο αραιότερο.

Απάντηση: Βλ. σελίδα 19.

6. Όταν το φως μεταβαίνει από ένα μέσο σε κάποιο άλλο, ποια από τα παρακάτω μεγέθη μεταβάλλονται:

α. το μήκος κύματός του,

β. η συχνότητά του,

γ. η ταχύτητά του;

Απάντηση: Η συχνότητά του.

7. Σημειώστε με Σ ή Λ όποιες από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστές ή λάθος αντίστοιχα:

α. Το φως διαδίδεται σε όλα τα οπτικά υλικά μέσα με ταχύτητα περίπου $3x10^8$m/s.

β. Το φως διαδίδεται στο κενό με ταχύτητα περίπου $3x10^8$m/s.

γ. Η ταχύτητα του φωτός μικραίνει, όταν το φως περνά από πυκνότερο σε αραιότερο οπτικό υλικό μέσο.

δ. Η ταχύτητα του φωτός μικραίνει, όταν το φως περνά από αραιότερο σε πυκνότερο οπτικό υλικό μέσο.

Απάντηση: α - Λ, β - Σ, γ - Λ, δ - Σ.

8. Ποιο φαινόμενο ονομάζεται διασκεδασμός του φωτός;

Απάντηση: Η εξάρτηση της ταχύτητας του φωτός και του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος ονομάζεται διασκεδασμός.

9. Κατά την ανάλυση του λευκού φωτός παίρνουμε μία ταινία με διάφορα χρώματα. Μπορείτε να εξηγήσετε γιατί συμβαίνει αυτό;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 20.

10. Φως μεγαλύτερου μήκους κύματος (ερυθρό) έχει μεγαλύτερη ταχύτητα σε ένα μέσο από φως μικρότερου μήκους κύματος (ιώδες). Εξηγήστε γιατί.

Απάντηση: Χρησιμοποιώντας τη σχέση $n=c_0/c$, έχουμε:

$n_{ερυθ} = \frac{c_0}{c_{ερυθ}}$ και $n_{ιώδ} = \frac{c_0}{c_{ιώδ}}$, όπου c_0 η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Από τις δύο σχέσεις προκύπτει ότι: $\frac{n_{ερυθ}}{n_{ιώδ}} = \frac{c_{ιώδ}}{c_{ερυθ}}$ και επειδή, $n_{ερυθ}<n_{ιώδ}$, έχουμε $c_{ιώδ}<c_{ερυθ}$.

11. Δύο μονοχρωματικές ακτίνες φωτός, η κόκκινη και η κίτρινη, εκτρέπονται από γυάλινο πρίσμα. Ποιες από τις προτάσεις που ακολουθούν είναι σωστές ή λάθος ;

α. Η γωνία εκτροπής της κόκκινης είναι μικρότερη από την αντίστοιχη της κίτρινης.

β. Η γωνία εκτροπής της κόκκινης είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της κίτρινης.
γ. Η κόκκινη ακτίνα διαδίδεται στο γυαλί με μεγαλύτερη ταχύτητα από ό,τι η κίτρινη.
δ. Η κόκκινη και η κίτρινη ακτίνα διαδίδονται στο γυαλί με την ίδια ταχύτητα.

Απάντηση: α - Σ, γ - Σ. (β - Λ, δ - Λ)

12. Οι δείκτες διάθλασης ενός τυπικού γυαλιού, που ακολουθούν, αντιστοιχούν σε καθένα από τα χρώματα. Να κάνετε την αντιστοιχία χρώματος - δείκτη διάθλασης.

Ιώδες	1,530
Μπλε	1,520
Πράσινο	1,517
Κίτρινο	1,512
Πορτοκαλί	1,525
Κόκκινο	1,508

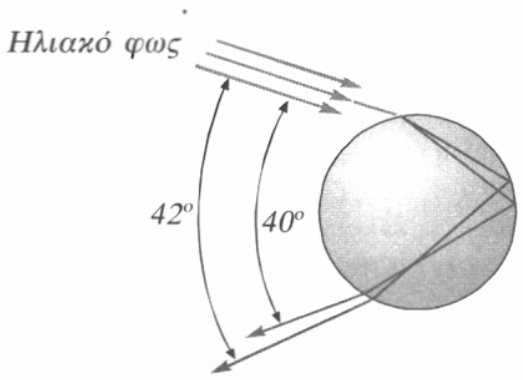
Απάντηση: (Ιώδες - 1,530), (Μπλε - 1,525), (Πράσινο - 1,520), (Κίτρινο - 1,517), (Πορτοκαλί - 1,512), (Κόκκινο - 1,508).

13. Ποια είναι τα χαρακτηριστικά του φωτός σε σχέση με τη διάδοσή του σε οπτικά μέσα;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 21.

14. Στο σχήμα βλέπουμε το ηλιακό φως να προσπίπτει σε σταγόνα βροχής. Ποια φαινόμενα παρατηρούνται κατά την πορεία των ακτίνων;

Απάντηση: Όταν το φως εισέρχεται από τον αέρα στη σταγόνα, έχουμε το φαινόμενο της διάθλασης. Στο εσωτερικό της σταγόνας έχουμε το φαινόμενο της ανάκλασης. Όταν το φως εξέρχεται, από τη σταγόνα έχουμε πάλι το φαινόμενο της διάθλασης. Κατά την είσοδο και την έξοδο του φωτός έχουμε την ανάλυση αυτού στα γνωστά χρώματα της ίριδας.



15. Το χρώμα του ουρανού είναι μπλε, γιατί...
α. τα μόρια του αέρα είναι μπλε.
β. η ίριδα των ματιών μας είναι μπλε.
γ. η σκέδαση του φωτός είναι εντονότερη στα μικρά μήκη κύματος.
δ. η σκέδαση του φωτός είναι εντονότερη στα μεγάλα μήκη κύματος.
Ποια από τις παραπάνω προτάσεις είναι η σωστή;

Απάντηση: Η γ είναι η σωστή.

16. Τι είναι τα πολωτικά φίλτρα ή πολωτές;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 26.

17. Χρησιμοποιούμε γυαλιά τύπου polaroid, για να «κόψουμε», όσο το δυνατόν, την αντηλιά (έντονη ανάκλαση) του φωτός που προκαλούν λείες επιφάνειες, όταν το φως προσπίπτει σ' αυτές (λόγου χάρη στην επιφάνεια της θάλασσας, όταν επικρατεί μπονάτσα). Ποια πρέπει να είναι η διεύθυνση της πόλωσης του υλικού polaroid, για να είναι τα γυαλιά αποτελεσματικά;

Απάντηση: Επειδή η ανακλώσα επιφάνεια είναι οριζόντια, το ανακλώμενο φως θα περιέχει περίσσεια πολωμένου φωτός στην οριζόντια διεύθυνση. Η διεύθυνση της πόλωσης του υλικού polaroid, για να είναι τα γυαλιά αποτελεσματικά, πρέπει να είναι κατακόρυφη.

18. Να αναφέρετε τρεις τουλάχιστον ιδιότητες της υπεριώδους ακτινοβολίας οι οποίες μας πληροφορούν για την ύπαρξή της.

Απάντηση: Βλ. σελίδα 23.

19. Με ποιο τρόπο αντιλαμβανόμαστε ότι πέρα από την ερυθρή περιοχή του φάσματος του ορατού φωτός υπάρχει αόρατη υπέρυθρη ακτινοβολία;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 24.

20. Πώς ονομάζονται τα όργανα με τα οποία ανιχνεύεται η υπέρυθρη ακτινοβολία και σε ποια αρχή βασίζεται η λειτουργία τους;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 24.

21. Τι ονομάζουμε φυσικό και τι γραμμικά πολωμένο φως;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 25.

22. Γιατί οι αστροναύτες, όταν βρίσκονται στη Σελήνη, βλέπουν μαύρο τον ουρανό;

Απάντηση: Αυτό συμβαίνει γιατί δεν υπάρχουν μόρια, για να σκεδάσουν το φως.

23. Μπορούμε με έναν πολωτή να αντιληφθούμε ότι το φως κάποιας πηγής που φθάνει στα μάτια μας είναι πολωμένο ή όχι; Μήπως είναι απαραίτητο να έχουμε δύο όμοιους πολωτές; Εξηγήστε γιατί.

Απάντηση: Δεν είναι απαραίτητο να έχουμε δύο πολωτές. Αν το φως που φθάνει στα μάτια μας, αφού περάσει από τον πολωτή, είναι πολωμένο, τότε, στρέφοντας το πολωτικό πλακίδιο αριστερά η δεξιά διαπιστώνουμε ότι αλλάζει η ένταση του φωτός (γίνεται πιο σκούρο το πλακίδιο) ή ανακόπτεται.

24. Τι ονομάζουμε γωνία ολικής πόλωσης; Να γράψετε το νόμο του Brewster.

Απάντηση: Βλ. σελίδα 28.

25. Το φως του ουρανού είναι:
α. μερικώς πολωμένο,
β. μόνο γραμμικά πολωμένο,
γ. μη πολωμένο.

Απάντηση: Είναι μερικώς πολωμένο.

Α Σ Κ Η Σ Ε Ι Σ Κ Α Ι Π Ρ Ο Β Λ Η Μ Α Τ Α

1. Σε ένα πείραμα μέτρησης της ταχύτητας του φωτός με τη μέθοδο του Fizeau η απόσταση μεταξύ της φωτεινής πηγής και του κατόπτρου είναι 12945m και ο τροχός έχει 720 διάκενα. Να υπολογίσετε την ελάχιστη συχνότητα περιστροφής του τροχού αυτού, αν η πειραματική ταχύτητα του φωτός που προέκυψε ήταν $2{,}982 \times 10^8$m/s.

Απάντηση: $c = 2\ell \cdot f \cdot N$, οπότε $f = \dfrac{c}{2\ell \cdot N} = \dfrac{2{,}982 \cdot 10^8 \text{m/s}}{2 \cdot 12945\text{m} \cdot 720}$ ή f=16Hz

2. Μία δέσμη φωτός που διαδίδεται στο κενό έχει μήκος κύματος 600nm:

(α) Να υπολογίσετε την ταχύτητα διάδοσης αυτής της δέσμης σε γυαλί με δείκτη διάθλασης 1,6.

(β) Ποια τιμή έχει το μήκος κύματος της δέσμης, όταν αυτή διαδίδεται στο γυαλί; Δίνεται ότι η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι 300000km/s.

Απάντηση:

(α) $c = \frac{c_0}{n}$ ή $c = \frac{3 \cdot 10^8 \, m/s}{1,6} = 1,875 \cdot 10^8 \, m/s$

(β) $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$ ή $\lambda = \frac{600nm}{1,6} = 375nm$

3. Μονοχρωματική ακτίνα φωτός ορισμένης συχνότητας έχει μήκος κύματος 500nm, όταν διαδίδεται στο νερό. Να υπολογιστεί το μήκος κύματος αυτού του φωτός, όταν διαδίδεται στο βενζόλιο. Οι δείκες διάθλασης του νερού και του βενζολίου είναι αντίστοιχα 1,333 και 1,501.

Απάντηση:

Ισχύουν $\lambda_{νερ} = \frac{\lambda_0}{n_{νερ}}$ και $\lambda_{βεν} = \frac{\lambda_0}{n_{βεν}}$. Από τις σχέσεις αυτές βρίσκουμε:

$\lambda_{νερ} \cdot n_{νερ} = \lambda_{βεν} \cdot n_{βεν}$ ή $\lambda_{βεν} = \frac{\lambda_{νερ} \cdot n_{νερ}}{n_{βεν}} = \frac{500nm \cdot 1,333}{1,501}$ ή $\lambda_{βεν}$=444nm

4. Φως έχει μήκος κύματος 560nm στο κενό. Όταν διαδίδεται στο νερό, έχει ταχύτητα $2,25x10^8$ m/s. Αν το φως αυτό διαδιδόταν στο νερό, ποιο θα ήταν τότε το μήκος κύματός του; Δίνεται ότι η ταχύτητα στο κενό είναι $3x10^8$m/s.

Απάντηση:

Ισχύουν $\lambda_{νερ} = \frac{\lambda_0}{n_{νερ}}$ και $c_{νερ} = \frac{c_0}{n_{νερ}}$. Από τις σχέσεις αυτές βρίσκουμε:

$\lambda_{νερ} = \frac{c_{νερ}}{c_0} \cdot \lambda_0$ ή $\lambda_{νερ} = \frac{2,25 \cdot 10^8 \, m/s}{3 \cdot 10^8 \, m/s} \cdot 560nm$ ή λ=420nm

5. Φως που διαδίδεται στο κενό έχει μήκος κύματος λ_0. Όταν το ίδιο φως διαδίδεται στην αιθανόλη, έχει μήκος κύματος 440nm και στη γλυκερίνη 405nm. Ποιος είναι ο λόγος του δείκτη διάθλασης της αιθανόλης προς το δείκτη διάθλασης της γλυκερίνης σε μήκος κύματος λ_0;

Απάντηση:

Τα μήκη κύματος, όταν το φως διαδίδεται στην αιθανόλη και στη γλυκερίνη, είναι αντίστοιχα: $\lambda_{αιθ} = \frac{\lambda_0}{n_{αιθ}}$ και $\lambda_{γλ} = \frac{\lambda_0}{n_{γλ}}$.

Από τις σχέσεις αυτές βρίσκουμε: $\frac{n_{\alpha\iota\theta}}{n_{\gamma\lambda}} = \frac{\lambda_{\gamma\lambda}}{\lambda_{\alpha\iota\theta}}$ ή $\frac{n_{\alpha\iota\theta}}{n_{\gamma\lambda}} = \frac{405nm}{440nm} = 0,92$

6. Φυσικό φως που διαδίδεται στον αέρα συναντά λεία επιφάνεια πάγου. Η ανακλώμενη ακτίνα βρέθηκε ολικώς πολωμένη. Να προσδιορίσετε τη γωνία πρόσπτωσης. Ο δείκτης διάθλασης του πάγου είναι 1,309.

Απάντηση:

Από το νόμο του Brewster έχουμε: $n=\varepsilon\varphi\theta_p$ ή $\varepsilon\varphi\theta_p=1,309$, οπότε $\theta=52,6^o$.

7. Μονοχρωματική δέσμη φωτός που διαδίδεται στο νερό προσπίπτει σε γυάλινο κύβο, ο οποίος είναι βυθισμένος εξ ολοκλήρου στο νερό, υπό γωνία πρόσπτωσης 50°. Ένα μέρος της δέσμης ανακλάται, ενώ το άλλο διαθλάται. Αν η γωνία διάθλασης και η γωνία ανάκλασης έχουν άθροισμα 90°, να υπολογίσετε το δείκτη διάθλασης του γυάλινου κύβου για το φως αυτό, αν ο δείκτης διάθλασης του νερού είναι 1,333.

Απάντηση:

Όταν η γωνία διάθλασης και η γωνία ανάκλασης έχουν άθροισμα 90° τότε η ανακλώμενη δέσμη είναι πλήρως πολωμένη. Ισχύει λοιπόν:

$$\frac{n_\gamma}{n_\nu} = \varepsilon\varphi\,\theta_p \text{ ή } n_\gamma = n_{\nu\varepsilon\rho}\cdot\varepsilon\varphi\,\theta_p \text{ ή } n_\gamma = 1,333\cdot\varepsilon\varphi 50^o = 1,333\cdot 1,191 = 1,585$$

8. Μονοχρωματική δέσμη φυσικού φωτός που διαδίδεται στον αέρα προσπίπτει στη λεία επιφάνεια ενός κρυστάλλου χαλαζία υπό γωνία 57° (ως προς την κάθετο στο σημείο πρόσπτωσης). Η ανακλώμενη δέσμη βρέθηκε ότι είναι ολικώς πολωμένη:

(α) Πόσος είναι ο δείκτης διάθλασης του χαλαζία;

(β) Πόση είναι η γωνία διάθλασης;

Απάντηση:

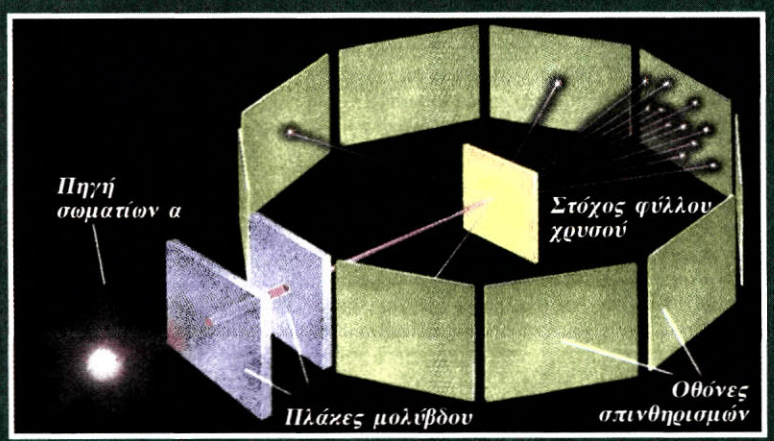
(α) Επειδή η ανακλώμενη δέσμη είναι ολικώς πολωμένη, ισχύει ο νόμος του Brewster: $n=\varepsilon\varphi\theta_p$ ή $n=\varepsilon\varphi 57^o$ ή $n=1,54$.

(β) Όταν η ανακλώμενη γωνία είναι πλήρως πολωμένη, τότε η γωνία διάθλασης και η γωνία ανάκλασης έχουν άθροισμα 90°. Άρα $\theta_2+\theta_p=90^o$ ή $\theta_2=33^o$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΤΟΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

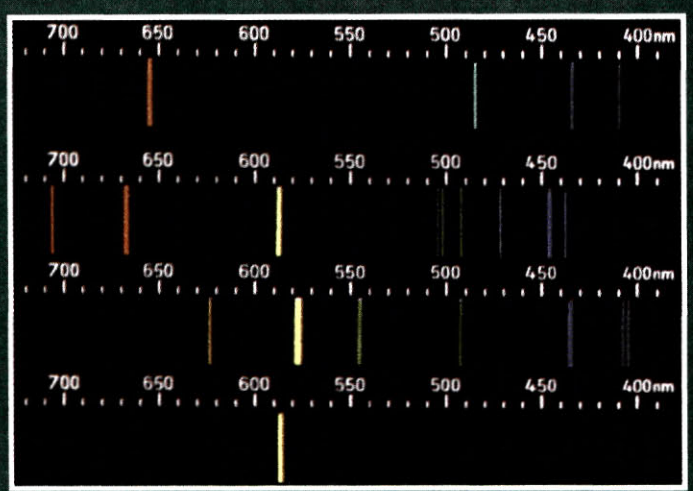
- Ενέργεια του ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου
- Διακριτές ενεργειακές στάθμες
- Μηχανισμός παραγωγής και απορρόφησης φωτονίων
- Ακτίνες Χ

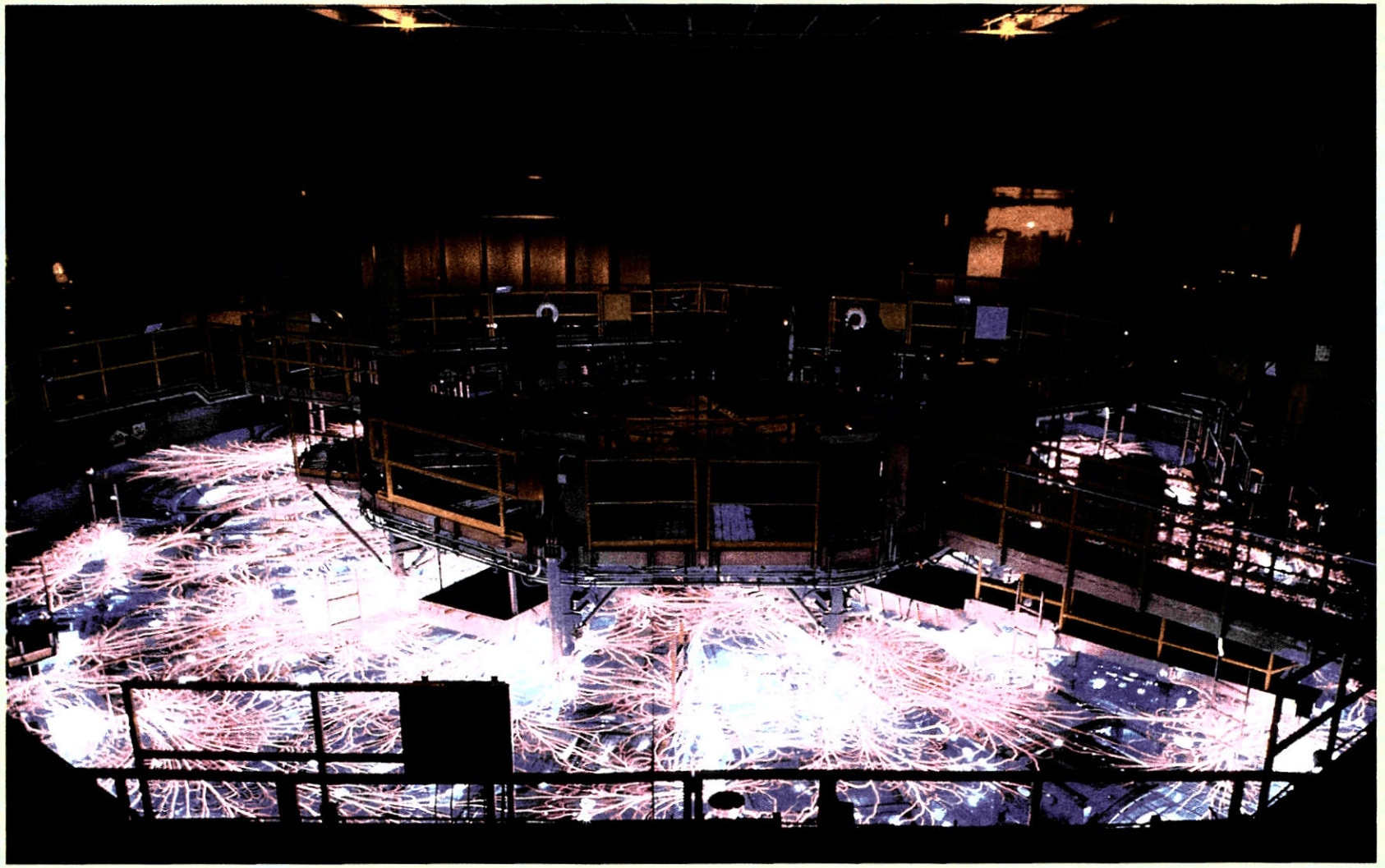


Πείραμα του Rutherford

Σκέδαση σωματίων α από ένα λεπτό φύλλο χρυσού. Το πείραμα αυτό έδειξε ότι το θετικό φορτίο και το μεγαλύτερο μέρος της μάζας ενός ατόμου είναι συγκεντρωμένα σε μια μικρή περιοχή του ατόμου, που ονομάστηκε πυρήνας.

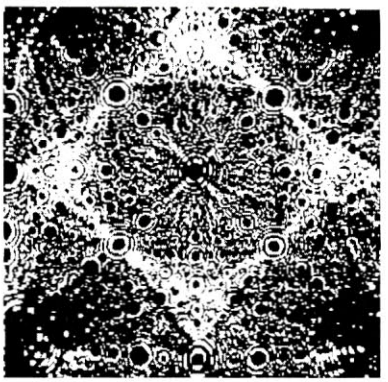
Φάσματα εκπομπής ατόμων





Στο πυρηνικό εργαστήριο Sandia στο Νεο Μεξικό ένας επιταχυντής φορτισμένων σωματιδίων (μηχανή Z) παράγει μέσα σε ελάχιστο χρόνο δέκα φορές περισσότερη ενέργεια από όλους μαζί τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής στον κόσμο. Η ενέργεια παράγεται υπό μορφή ακτίνων X. Ηλεκτρικές εκκενώσεις φωτίζουν την επιφάνεια της μηχανής Z. Η παραγόμενη ισχύς είναι 210 τρισεκατομμύρια Watt.

2-1 Ένας φύλακας του ατομικού ρολογιού καισίου στο Γραφείο Μέτρων και Σταθμών της Ουάσιγκτον.



2-2 Άτομα στην επιφάνεια μιας μύτης βελόνας όπως φαίνονται με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο πεδίου.

2.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟΥ ΣΤΟ ΑΤΟΜΟ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Πρώτοι οι αρχαίοι Έλληνες φιλόσοφοι ασχολήθηκαν με το πρόβλημα των συστατικών της ύλης. Ο Λεύκιππος και ο Δημόκριτος υποστήριζαν ότι η ύλη αποτελείται από πολύ μικρά σωματίδια, τα οποία δεν μπορούν να διαιρούνται απεριόριστα και γι' αυτό ονομάστηκαν ά-τομα (δηλαδή άτμητα). Διατύπωσαν λοιπόν μια φιλοσοφική θεωρία, για να ερμηνεύσουν τις ιδιότητες των υλικών σωμάτων. Υποστήριξαν ότι η ύλη αποτελείται από άτομα που διαφέρουν μεταξύ τους κατά το σχήμα και κατά το μέγεθος. Τα άτομα δε δημιουργούνται ούτε καταστρέφονται και επομένως είναι άφθαρτα και αιώνια. Τα άτομα είναι πάρα πολλά και βρίσκονται σε διαρκή κίνηση μέσα στο κενό. Τα διάφορα φυσικά φαινόμενα οφείλονται στην κίνηση των ατόμων. Ο σχηματισμός των υλικών σωμάτων οφείλεται στις ενώσεις των ατόμων με άλλα άτομα, ενώ αντίθετα η καταστροφή των σωμάτων οφείλεται στο διαχωρισμό των ατόμων.

Ο Επίκουρος επηρεάστηκε από τη θεωρία του Δημόκριτου. Ένα μέρος της θεωρίας αυτής βρίσκεται σε ένα ποίημα του Ρωμαίου ποιητή Λουκρήτιου, όπου περιγράφεται, με βάση τις ατομικές αντιλήψεις του Δημόκριτου, η πίεση που ασκούν τα αέρια, η διάχυση των οσμών και το σχήμα των κρυστάλλων.

Η ατομική θεωρία του Δημόκριτου ήταν μία από τις φιλοσοφικές θεωρίες των αρχαίων Ελλήνων. Δεν υπήρχε καμία πειραματική παρατήρηση για την υποστήριξή της. Η θεωρία του Δημόκριτου καταπολεμήθηκε από τον Πλάτωνα, τον Αριστοτέλη και τους μαθητές τους και έπεσε σε αφάνεια μέχρι το 19ο αιώνα.

2-3 Δημόκριτος ο Αβδηρίτης (470-360 π.Χ.). Αρχαίος Έλληνας φιλόσοφος, ιδρυτής της ατομικής θεωρίας.

2-4 Αριστερά ο Άγγλος φυσικός J. J. Thomson (1856-1940) και δεξιά ο Ernest Rutherford (1871-1937).

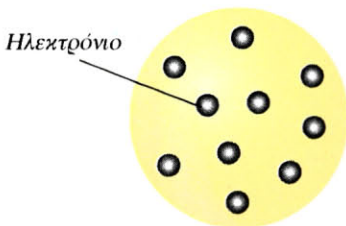
Στις αρχές του 19ου αιώνα ο Dalton (Ντάλτον) επανέφερε την ατομική θεωρία, για να εξηγήσει τους νόμους της Χημείας που ανακάλυψε πειραματικά.

Σημαντικό σταθμό στην εξέλιξη των επιστημονικών ιδεών για το άτομο αποτέλεσε η ανακάλυψη του ηλεκτρονίου από τον Thomson (Τόμσον) κατά το τέλος του 19ου αιώνα.

Η ανακάλυψη του ηλεκτρονίου ως συστατικό του ατόμου έδειξε ότι το άτομο έχει εσωτερική δομή και επομένως δεν είναι άτμητο. Επειδή η ύλη είναι ηλεκτρικά ουδέτερη, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι και τα άτομα της ύλης είναι ηλεκτρικά ουδέτερα και επομένως το άτομο θα έχει ίσες ποσότητες θετικού και αρνητικού φορτίου.

Επίσης τα πειράματα έδειξαν ότι η μάζα του τμήματος που είναι θετικά φορτισμένο είναι μεγαλύτερη από τη μάζα των ηλεκτρονίων του ατόμου.

Το ερώτημα που τέθηκε στη συνέχεια ήταν: **«πώς η μάζα και το φορτίο κατανέμονται στο εσωτερικό του ατόμου;»**



2-5 Το άτομο σύμφωνα με το πρότυπο του Thomson.

Πρότυπο του Thomson

Ο Thomson (Τόμσον) πρότεινε ένα πρότυπο σύμφωνα με το οποίο το άτομο αποτελείται από μια σφαίρα θετικού φορτίου, ομοιόμορφα κατανεμημένου, μέσα στο οποίο είναι ενσωματωμένα τα ηλεκτρόνια, όπως οι σταφίδες μέσα σε ένα σφαιρικό σταφιδόψωμο.

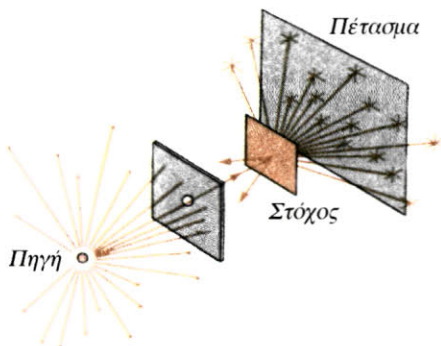
Πρότυπο του Rutherford

Ο Rutherford (Ράδερφορντ) και οι μαθητές του πραγματοποίησαν τα πρώτα πειράματα, για να διερευνήσουν την εσωτερική δομή του ατόμου, τα αποτελέσματα των οποίων ήλθαν σε αντίθεση με το πρότυπο του Thomson. Στα πειράματα αυτά μια δέσμη θετικά φορτισμένων σωματίων α κατευθύνεται σε λεπτό μεταλλικό φύλλο χρυσού (στόχος). Σύμφωνα με το πρότυπο του Thomson, η δέσμη των σωματίων α δε θα πρέπει να αποκλίνει σημαντικά για τους εξής λόγους:

α. Το ολικό ηλεκτρικό φορτίο του ατόμου είναι μηδέν και επομένως δεν ασκείται ηλεκτρική δύναμη στα σωμάτια α, όσο αυτά βρίσκονται στο εξωτερικό του ατόμου.

β. Επειδή το θετικό ηλεκτρικό φορτίο είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο, δεν μπορεί να ασκεί σημαντική απωστική δύναμη στα σωμάτια α, όσο αυτά βρίσκονται στο εσωτερικό του ατόμου.

γ. Η σύγκρουση των σωματίων α με τα ηλεκτρόνια δεν επηρεάζει σημαντικά την κίνησή τους, γιατί τα ηλεκτρόνια έχουν πολύ μικρότερη μάζα. Με τον ίδιο τρόπο δεν επηρεάζεται σημαντικά η κίνηση μιας βαριάς πέτρας μέσα στη βροχή.



2-6 Πείραμα του Rutherford. Σκέδαση σωματίων α από ένα λεπτό φύλλο χρυσού. Περίπου ένα στα 8000 σωμάτια αποκλίνει κατά γωνία μεγαλύτερη των 90°. Τα σωμάτια α είναι πυρήνες ηλίου.

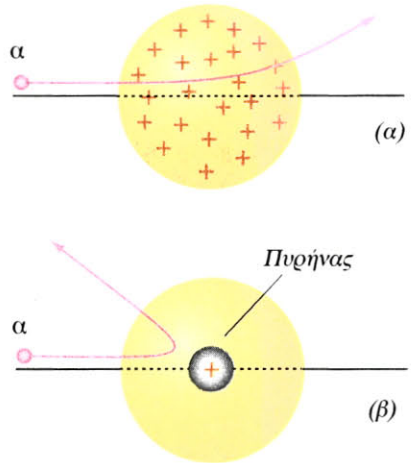
Ο Rutherford παρατήρησε ότι τα περισσότερα από τα σωμάτια α διέρχονται μέσα από το στόχο σχεδόν ανεπηρέαστα, σαν να κινούνται μέσα σε σχεδόν κενό χώρο. **Αρκετά αποκλίνουν σε διάφορες γωνίες. Λίγα όμως αποκλίνουν κατά 180°**. Αυτό μπορεί να συμβεί μόνο, αν το θετικό φορτίο είναι συγκεντρωμένο σε μικρό

χώρο, ώστε να ασκεί στα σωμάτια α μεγάλες απωστικές ηλεκτρικές δυνάμεις.

Για να ερμηνεύσει ο Rutherford τις πειραματικές παρατηρήσεις του, πρότεινε ένα πρότυπο σύμφωνα με το οποίο:

Το άτομο αποτελείται από μία πολύ μικρή περιοχή στην οποία είναι συγκεντρωμένο όλο το θετικό φορτίο και σχεδόν όλη η μάζα του ατόμου. Η περιοχή αυτή ονομάζεται πυρήνας. Ο πυρήνας περιβάλλεται από ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια πρέπει να κινούνται γύρω από τον πυρήνα σε κυκλικές τροχιές, όπως οι πλανήτες γύρω από τον Ήλιο, γιατί, αν ήταν ακίνητα, θα έπεφταν πάνω στον πυρήνα εξαιτίας της ηλεκτρικής έλξης που δέχονται από αυτόν.

Το πρότυπο του Rutherford ονομάζεται και **πλανητικό μοντέλο** του ατόμου, γιατί αποτελεί μικρογραφία του ηλιακού πλανητικού συστήματος. Αποτελεί ένα μεγάλο βήμα, που πλησιάζει στην εικόνα του ατόμου όπως τη γνωρίζουμε σήμερα. Όμως το μοντέλο αυτό, όπως θα δούμε παρακάτω, παρουσιάζει ορισμένες σημαντικές αδυναμίες.

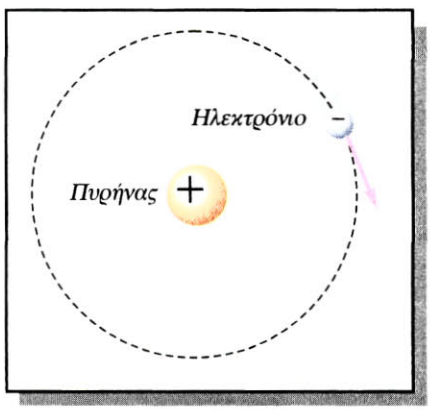


2-7 (α) Τα σωμάτια α αποκλίνουν κατά μικρή γωνία σύμφωνα με το πρότυπο του Thomson. (β) Τα σωμάτια α αποκλίνουν κατά μεγάλη γωνία σύμφωνα με το πρότυπο του Rutherford.

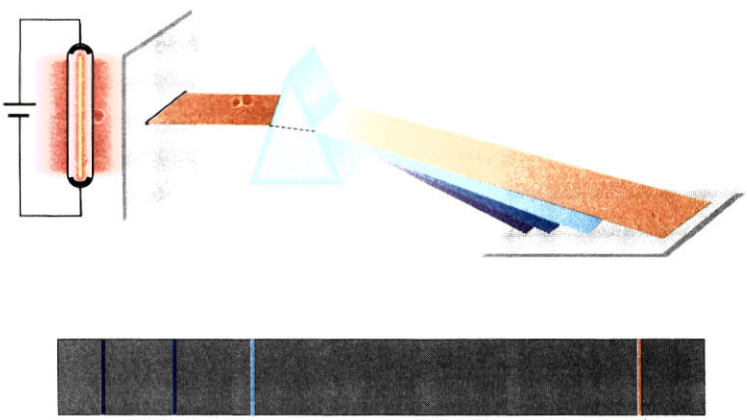
Ατομικά φάσματα

Όταν εφαρμόσουμε ορισμένη τάση σε γυάλινο σωλήνα που περιέχει αέριο σε χαμηλή πίεση (όπως στις διαφημιστικές λυχνίες νέου), τότε θα παρατηρήσουμε ότι το αέριο εκπέμπει φως. Αν το φως αυτό αναλυθεί, όταν, για παράδειγμα, περάσει μέσα από ένα πρίσμα, τότε θα παρατηρήσουμε μια σειρά από φωτεινές γραμμές. Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε ένα διαφορετικό μήκος κύματος ή χρώμα. Όπως γνωρίζουμε, η σειρά των γραμμών που παρατηρούνται ονομάζεται **γραμμικό φάσμα εκπομπής** του αερίου.

Τα μήκη κύματος που περιέχει το γραμμικό φάσμα εκπομπής είναι χαρακτηριστικά του στοιχείου που εκπέμπει το φως. Δεν υπάρχουν δύο διαφορετικά στοιχεία που να έχουν το ίδιο φάσμα εκπομπής. Το δεδομένο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των στοιχείων που περιέχονται σε μια ουσία. Δηλαδή το γραμμικό φάσμα παίζει το ρόλο των δακτυλικών αποτυπωμάτων. Όπως από τα δακτυλικά αποτυπώματα μπορούμε να βρούμε τον άνθρωπο στον οποίο ανήκουν, έτσι και από το γραμμικό φάσμα μπορούμε να βρούμε το στοιχείο στο οποίο ανήκει.

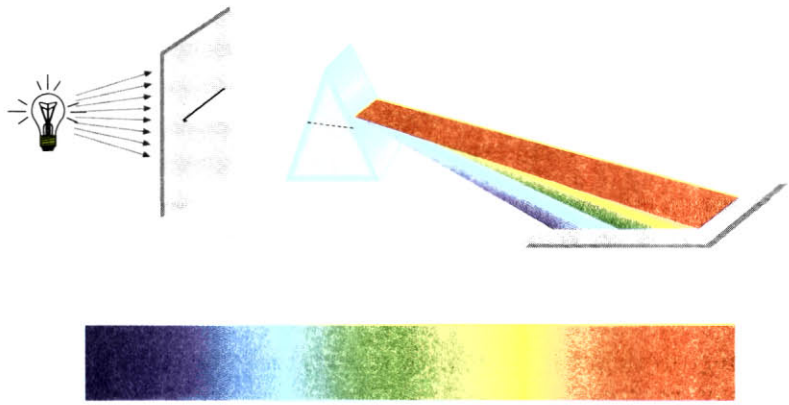


2-8 Μοντέλο του Rutherford για το άτομο (πλανητικό μοντέλο).



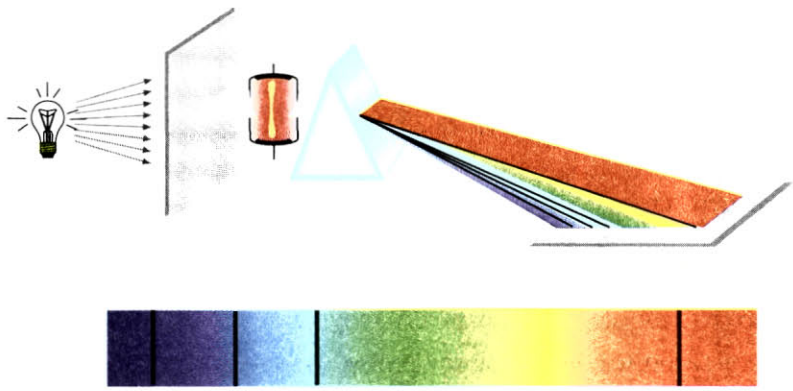
2-9 Γραμμικό φάσμα εκπομπής του υδρογόνου. Το φως που εκπέμπει το αέριο περνάει μέσα από ένα πρίσμα και το φάσμα αποτυπώνεται σε ευαίσθητο φιλμ.

Ένα αέριο μπορεί όχι μόνο να εκπέμπει φως, αλλά μπορεί και να απορροφά φως. Αν φωτίσουμε με πηγή που εκπέμπει λευκό φως ένα πρίσμα, πίσω από το οποίο έχει τοποθετηθεί πέτασμα, τότε θα παρατηρήσουμε πάνω στο πέτασμα μια συνεχή χρωματιστή ταινία. Η ταινία αυτή των χρωμάτων, όπως γνωρίζουμε, ονομάζεται **συνεχές φάσμα** του λευκού φωτός.



2-10 Συνεχές φάσμα του λευκού φωτός.

Αν τώρα ανάμεσα στην πηγή του λευκού φωτός και στο πρίσμα τοποθετηθεί γυάλινο δοχείο που περιέχει κάποιο αέριο, τότε θα παρατηρήσουμε ότι η χρωματιστή ταινία διακόπτεται από σκοτεινές γραμμές. Η ταινία αυτή των χρωμάτων ονομάζεται **γραμμικό φάσμα** απορρόφησης του αερίου. Οι σκοτεινές γραμμές εμφανίζονται σε εκείνες ακριβώς τις συχνότητες στις οποίες εμφανίζονται οι φωτεινές γραμμές του φάσματος εκπομπής του ίδιου αερίου.



2-11 Γραμμικό φάσμα απορρόφησης του υδρογόνου.

Επομένως το πείραμα δείχνει ότι:

α. *Το φάσμα εκπομπής ή απορρόφησης ενός αερίου αποτελείται από ορισμένες φασματικές γραμμές που είναι χαρακτηριστικές του αερίου. Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε ορισμένη συχνότητα (ή μήκος κύματος).*

β. *Κάθε γραμμή του φάσματος απορόφησης του αερίου συμπίπτει με μία γραμμή του φάσματος εκπομπής του. Δηλαδή κάθε αέριο απορροφά μόνο εκείνες τις ακτινοβολίες τις οποίες μπορεί να εκπέμπει.*

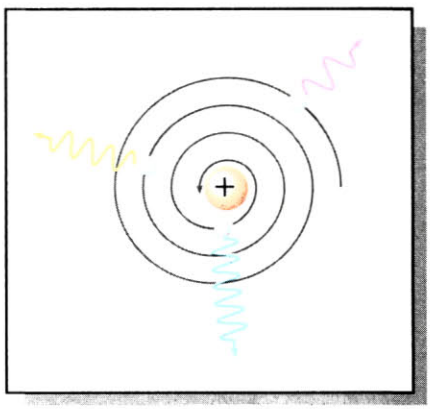
Τα γραμμικά φάσματα των αερίων αποτέλεσαν **το κλειδί** για την έρευνα της δομής του ατόμου. Κάθε θεωρία για τη δομή του ατόμου πρέπει να εξηγεί γιατί τα άτομα εκπέμπουν ή απορροφούν μόνο ορισμένες ακτινοβολίες και γιατί απορροφούν μόνο εκείνες τις ακτινοβολίες που μπορούν να εκπέμπουν.

Το μοντέλο του Rutherford αδυνατούσε να εξηγήσει τα γραμμικά φάσματα των αερίων για τους παρακάτω λόγους:

Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, το ηλεκτρόνιο περιφέρεται γύρω από τον πυρήνα σε κυκλική τροχιά. Το μέτρο της ταχύτητάς του είναι σταθερό, αλλά η κατεύθυνσή της συνεχώς μεταβάλλεται και επομένως το ηλεκτρόνιο έχει επιτάχυνση. Σύμφωνα με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία, το ηλεκτρόνιο, όπως και κάθε επιταχυνόμενο φορτίο, εκπέμπει ακτινοβολία, δηλαδή ακτινοβολεί ενέργεια. Η ενέργεια του ηλεκτρονίου θα πρέπει να μειώνεται συνεχώς. Επομένως θα πρέπει να κινείται σε σπειροειδή τροχιά με διαρκώς μειούμενη ακτίνα και με διαρκώς μεταβαλλόμενη συχνότητα, μέχρις ότου πέσει στον πυρήνα.

Η συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας θα πρέπει να είναι ίση με τη συχνότητα περιφοράς του ηλεκτρονίου, η οποία μεταβάλλεται συνεχώς.

Άρα, σύμφωνα με το μοντέλο του Rutherford, τα άτομα θα έπρεπε να εκπέμπουν συνεχές φάσμα και όχι γραμμικό, όπως παρατηρείται στην πράξη.



2-12 Ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο του ατόμου. Σύμφωνα με την κλασική Φυσική, το επιταχυνόμενο ηλεκτρόνιο έπρεπε να εκπέμπει συνεχές φάσμα και ακολουθώντας σπειροειδή τροχιά να πέφτει στον πυρήνα.

Για να ερμηνεύσει τα γραμμικά φάσματα του υδρογόνου, ο Bohr πρότεινε ένα νέο πρότυπο για το άτομο του υδρογόνου.

Το πρότυπο του Bohr για το υδρογόνο

Στις αρχές του 20ού αιώνα οι επιστήμονες διαπίστωσαν ότι η κλασική Φυσική αδυνατούσε να ερμηνεύσει τα γραμμικά φάσματα των αερίων. Δεν μπορούσε να εξηγήσει:

- Γιατί το υδρογόνο εκπέμπει μόνο ορισμένα μήκη κύματος ακτινοβολίας;
- Γιατί απορροφά μόνο τα μήκη κύματος που εκπέμπει;

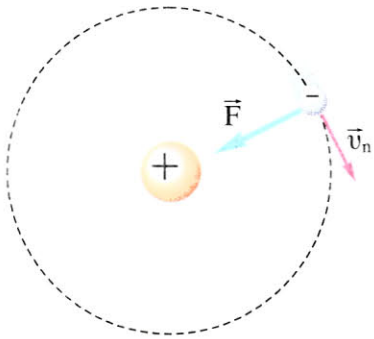
Για να απαντήσει στα παραπάνω ερωτήματα, ο Δανός φυσικός Bohr (Μπορ) πρότεινε ένα πρότυπο για το άτομο του υδρογόνου, που στηρίζεται στις παρακάτω παραδοχές:

α. Το ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου περιφέρεται γύρω από το θετικά φορτισμένο πυρήνα με την επίδραση της δύναμης Coulomb που δέχεται από αυτόν (σχήμα 2-14).

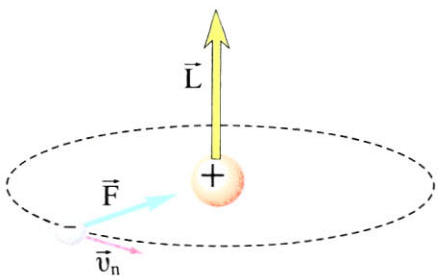
β. Το ηλεκτρόνιο μπορεί να κινείται μόνο σε ορισμένες τροχιές, οι οποίες ονομάζονται **επιτρεπόμενες τροχιές**. Οι επιτρεπόμενες τροχιές είναι εκείνες για τις οποίες ισχύει ότι η στροφορμή του ηλεκτρονίου είναι κβαντωμένη και ίση με ακέραιο πολλαπλάσιο της ποσότητας $\hbar = h / 2\pi$, όπου h είναι η σταθερά του Plank. Το μέτρο της στροφορμής του ηλεκτρονίου δίνεται από την εξίσωση:

$$L = m\upsilon r$$

2-13 Ο Δανός φυσικός Niels Bohr (1885-1962). Τιμήθηκε με το βραβείο Nobel Φυσικής το 1922 για την έρευνά του στη δομή των ατόμων.



2-14 Άτομο του υδρογόνου. *Το πρωτόνιο θεωρείται ακίνητο. Η δύναμη Coulomb F προκαλεί την απαιτούμενη κεντρομόλο επιτάχυνση. Το ηλεκτρόνιο λοιπόν περιφέρεται με ταχύτητα υ_n σε επιτρεπόμενη τροχιά ακτίνας r_n, ώστε να ισχύει:* $m\upsilon r = n\hbar$



2-14α *Το διάνυσμα της στροφορμής L του ηλεκτρονίου στο πρότυπο του Bohr.*

όπου m είναι η μάζα του ηλεκτρονίου, υ είναι το μέτρο της ταχύτητάς του και r η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς του. Εφαρμόζοντας τη συνθήκη σύμφωνα με την οποία η στροφορμή του ηλεκτρονίου είναι κβαντωμένη, έχουμε :

$$m\upsilon r = n\frac{h}{2\pi} = n\hbar\ ,\quad n=1, 2, 3, \ldots, \infty \qquad (2.1)$$

γ. Όταν το ηλεκτρόνιο κινείται σε ορισμένη επιτρεπόμενη τροχιά, δεν εκπέμπει ακτινοβολία. Η παραδοχή αυτή έρχεται σε αντίθεση με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία σύμφωνα με την οποία το ηλεκτρόνιο θα έπρεπε να ακτινοβολεί συνεχώς ενέργεια, να διαγράφει σπειροειδή τροχιά με διαρκώς μειούμενη ακτίνα και τελικά να πέφτει στον πυρήνα.

δ. Όταν το ηλεκτρόνιο μεταπηδήσει από μία επιτρεπόμενη τροχιά σε άλλη μικρότερης ενέργειας, τότε εκπέμπεται ένα φωτόνιο με ενέργεια ίση με τη διαφορά μεταξύ της αρχικής και της τελικής του ενέργειας. Αν E_α είναι η ενέργεια του ατόμου πριν από τη μετάβαση, E_τ η ενέργεια μετά τη μετάβαση και hf η ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου, τότε ισχύει:

$$E_\alpha - E_\tau = hf\ , \qquad (2.2)$$

Ολική ενέργεια ηλεκτρονίου

Θα υπολογίσουμε την κινητική, τη δυναμική και την ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου. Θεωρούμε ότι το ηλεκτρόνιο περιφέρεται γύρω από τον ακίνητο πυρήνα, ο οποίος αποτελείται από ένα πρωτόνιο. Σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, η ηλεκτρική ελκτική δύναμη $F = ke^2/r^2$, που ασκεί ο πυρήνας στο ηλεκτρόνιο, πρέπει να είναι ίση με $F = m\alpha_\kappa$, όπου $\alpha_\kappa = \upsilon^2/r$ είναι η κεντρομόλος επιτάχυνση του ηλεκτρονίου:

$$F = m\alpha_\kappa \quad \text{ή} \quad k\frac{e^2}{r^2} = m\frac{\upsilon^2}{r} \quad \text{ή} \quad \upsilon = e\sqrt{\frac{k}{mr}}$$

Αντικαθιστώντας την παραπάνω σχέση στην εξίσωση $K = \frac{1}{2}m\upsilon^2$ βρίσκουμε:

$$K = k\frac{e^2}{2r}$$

Η δυναμική ενέργεια του ηλεκτρονίου δίνεται από την εξίσωση:

$$U = -k\frac{e^2}{r}$$

Η ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι το άθροισμα της κινητικής και της δυναμικής του ενέργειας:

$$E = K + U = k\frac{e^2}{2r} + (-k\frac{e^2}{r}) \quad \text{ή}$$

$$E = -k\frac{e^2}{2r} \quad \text{Ολική ενέργεια ηλεκτρονίου} \qquad (2.3)$$

Όταν αναφερόμαστε στην ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου, εννοούμε την ενέργεια του συστήματος που αποτελείται από το ηλεκτρόνιο και τον ακίνητο πυρήνα του ατόμου. Η ενέργεια αυτή οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ του ηλεκτρονίου και του πυρήνα.

Επιτρεπόμενες τροχιές και τιμές ενέργειας

Η μικρότερη ακτίνα επιτρεπόμενης τροχιάς του ηλεκτρονίου ονομάζεται **ακτίνα του Bohr** και είναι ίση με $r_1=0{,}53\times10^{-10}$m. Οι ακτίνες των άλλων επιτρεπόμενων τροχιών του ηλεκτρονίου δίνονται από την εξίσωση:

$$r_n = n^2 r_1 \quad \text{Επιτρεπόμενες τροχιές} \qquad (2.4)$$

όπου n είναι ακέραιος θετικός αριθμός, ο οποίος ονομάζεται **κύριος κβαντικός αριθμός**, και μπορεί να πάρει τιμές από ένα μέχρι άπειρο:

$$n = 1, 2, 3, \ldots, \infty$$

Όταν το ηλεκτρόνιο κινείται στην τροχιά με τη μικρότερη ακτίνα (n=1), τότε έχει την ελάχιστη ενέργεια, που είναι ίση με $E_1=-13{,}6$ eV. Όταν κινείται στις άλλες επιτρεπόμενες τροχιές, τότε έχει ολική ενέργεια που δίνεται από την εξίσωση:

$$E_n = \frac{E_1}{n^2} \quad \text{Επιτρεπόμενες τιμές ενέργειας} \qquad (2.5)$$

Γνωρίζοντας τις τιμές των r_1 και E_1 και αντικαθιστώντας n=1, 2, 3, ... στις εξισώσεις 2.4 και 2.5, υπολογίζουμε τις επιτρεπόμενες τιμές της ακτίνας και της ενέργειας. Οι τιμές αυτές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

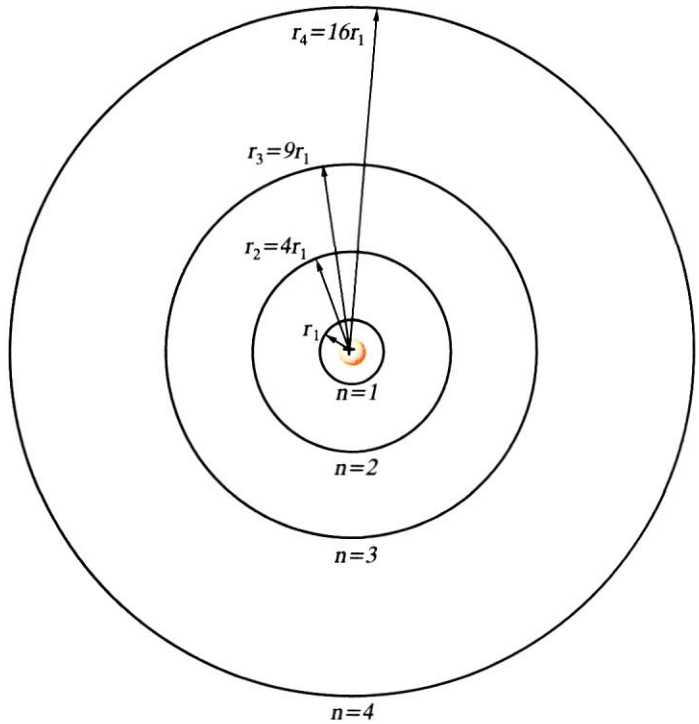
Κύριος κβαντικός αριθμός	n=1	n=2	n=3	...	$n \to \infty$
Ακτίνα	r_1	$4r_1$	$9r_1$	...	∞
Ολική ενέργεια	E_1	$E_1/4$	$E_1/9$	...	0

Οι τιμές της ενέργειας είναι αρνητικές. Η μεγαλύτερη τιμή της ενέργειας είναι E=0. Αντιστοιχεί σε $n\to\infty$ και $r\to\infty$ και περιγράφει την κατάσταση κατά την οποία το ηλεκτρόνιο έχει απομακρυνθεί από το άτομο (ιονισμός). Η φυσική σημασία του αρνητικού προσήμου της ολικής ενέργειας είναι ότι απαιτείται προσφορά ενέργειας, για να απομακρυνθεί το ηλεκτρόνιο σε περιοχή εκτός του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα.

Το ηλεκτρονιοβόλτ (eV)

Το ηλεκτρονιοβόλτ είναι η ενέργεια που μεταβιβάζεται σε ένα ηλεκτρόνιο, όταν αυτό επιταχύνεται μέσω διαφοράς δυναμικού 1V.

$1\text{eV}=1{,}6\times10^{-19}$ J



2-15 *Επιτρεπόμενες τροχιές του ηλεκτρονίου στο πρότυπο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου.*

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2 - 1

Ένα άτομο υδρογόνου που βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση έχει ολική ενέργεια E_1=-13,6eV. Η ακτίνα της τροχιάς του ηλεκτρονίου είναι $r_1=0{,}53\times10^{-10}$m. Να υπολογιστούν οι ακτίνες της τροχιάς και οι ενέργειες του ηλεκτρονίου στις δύο πρώτες διεγερμένες καταστάσεις, που αντιστοιχούν σε κβαντικούς αριθμούς n=2 και n=3.

ΛΥΣΗ Η ακτίνα της τροχιάς δίνεται από την εξίσωση:

$$r_n = n^2 \cdot r_1$$

Αντικαθιστώντας n=2 και n=3, βρίσκουμε:

$$r_2 = 2^2 r_1 = 4\,r_1 = 2{,}12 \cdot 10^{-10}\,\text{m}$$

$$r_3 = 3^2 r_1 = 9\,r_1 = 4{,}77 \cdot 10^{-10}\,\text{m}$$

Η ολική ενέργεια του ατόμου του υδρογόνου δίνεται από την εξίσωση:

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}$$

Αντικαθιστώντας n=2 και n=3, βρίσκουμε :

$$E_2 = \frac{E_1}{2^2} = \frac{E_1}{4} = -\frac{13{,}6\,\text{eV}}{4} = -3{,}4\,\text{eV}$$

$$E_3 = \frac{E_1}{3^2} = \frac{E_1}{9} = -\frac{13{,}6\,\text{eV}}{9} = -1{,}51\,\text{eV}$$

Απόδειξη των τύπων (2.4) και (2.5)

Χρησιμοποιούμε την εξίσωση που περιγράφει την κβάντωση της στροφορμής: $m\upsilon r = n\hbar$ (1) και το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα για το ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου:

$$F = m\alpha_\kappa \quad \text{ή} \quad k\frac{e^2}{r^2} = m\frac{\upsilon^2}{r} \quad \text{ή} \quad m\upsilon^2 r = ke^2 \quad (2)$$

Λύνουμε την (1) ως προς υ και αντικαθιστούμε το αποτέλεσμα στη (2):

$$m\frac{n^2\hbar^2}{m^2 r^2} r = ke^2 \quad \text{ή} \quad r = n^2\frac{\hbar^2}{mke^2}$$

Αντικαθιστώντας το r με r_n, έχουμε:

$r_n = n^2 \dfrac{\hbar^2}{mke^2}$, n=1, 2, 3, ... , ∞	Ακτίνες επιτρεπόμενων τροχιών (2.6)

Αντικαθιστώντας n=1, βρίσκουμε την τροχιά με τη μικρότερη ακτίνα r_1:

$$r_1 = \frac{\hbar^2}{mke^2}$$

Αντικαθιστώντας την τελευταία εξίσωση στη 2.6, παίρνουμε:

$$r_n = n^2 r_1$$

Αν αντικαταστήσουμε στην εξίσωση 2.3 το E με E_n και το r με r_n, παίρνουμε την ακόλουθη έκφραση για την ενέργεια του ατόμου:

$$E = -k\frac{e^2}{2r} \quad \text{ή} \quad E_n = -k\frac{e^2}{2r_n} \quad \text{ή λόγω της 2.6}$$

$E_n = -\dfrac{1}{n^2}\dfrac{mk^2e^4}{2\hbar^2}$ n=1, 2, 3, ... , ∞	Επιτρεπόμενες τιμές της ενέργειας (2.7)

Η μικρότερη τιμή της ενέργειας αντιστοιχεί σε n=1. Αντικαθιστώντας n=1 στην εξίσωση 2.7, βρίσκουμε:

$$E_1 = -\frac{mk^2e^4}{2\hbar^2} \quad \text{και} \quad E_n = \frac{E_1}{n^2}$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των σταθερών m, k, e και $\hbar = h/2\pi$, υπολογίζουμε τη μικρότερη επιτρεπόμενη ακτίνα r_1 και τη μικρότερη επιτρεπόμενη ενέργεια E_1. Είναι:

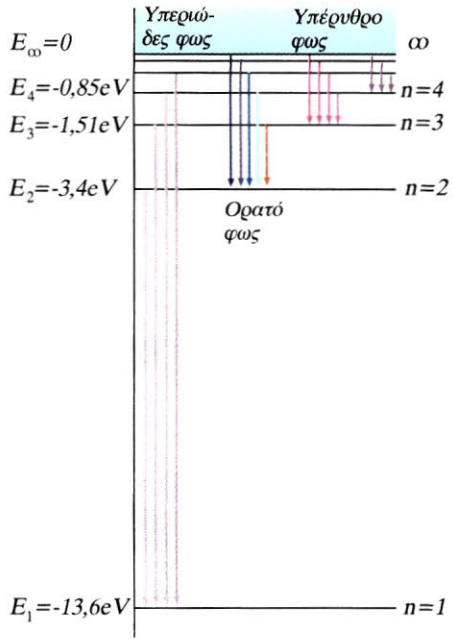
$$r_1 = 0{,}53 \cdot 10^{-10}\,\text{m} \quad \text{και} \quad E_1 = -13{,}6\,\text{eV}$$

Η έννοια της κβάντωσης της ενέργειας είναι σημαντική, γιατί εξηγεί ότι το ηλεκτρόνιο κινείται μόνο σε ορισμένες τροχιές καθορισμένης ενέργειας και δεν κινείται σπειροειδώς πλησιάζοντας συνεχώς προς τον πυρήνα. Επίσης η κβάντωση της ενέργειας έδωσε ώθηση στην ανάπτυξη της κβαντομηχανικής. Όμως η κβάντωση της στροφορμής, σύμφωνα με το πρότυπο του Bohr, έχει ιστορική μόνο σημασία.

2.2 ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΣΤΑΘΜΕΣ

Ενεργειακές στάθμες

Οι επιτρεπόμενες τιμές της ενέργειας του υδρογόνου και κάθε ατόμου ονομάζονται **ενεργειακές στάθμες**. Οι αντίστοιχες καταστάσεις του ατόμου ονομάζονται **ενεργειακές καταστάσεις**. Η κατάσταση με τη χαμηλότερη ενέργεια E_1 ονομάζεται **θεμελιώδης κατάσταση**. Όλες οι άλλες ενεργειακές καταστάσεις E_2, E_3, ... ονομάζονται **διεγερμένες καταστάσεις**.



2-16 *Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών του ατόμου του υδρογόνου. Οι μεταβάσεις των ηλεκτρονίων από μία τροχιά σε άλλη συμβολίζονται με κατακόρυφα βέλη.*

Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών

Παίρνουμε κατακόρυφο άξονα βαθμολογημένο σε τιμές ενέργειας και σχεδιάζουμε οριζόντιες ευθείες γραμμές στις θέσεις που αντιστοιχούν στις επιτρεπόμενες τιμές ενέργειας E_1, E_2, E_3, ... του ηλεκτρονίου. Το σχήμα που προκύπτει είναι το **διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών**.

Η απόσταση μεταξύ δύο ενεργειακών σταθμών αντιστοιχεί στη διαφορά των αντίστοιχων ολικών ενεργειών του ηλεκτρονίου. Η μετάβαση του ηλεκτρονίου από μία τροχιά σε άλλη συμβολίζεται με κατακόρυφο βέλος, που έχει αρχή την αρχική στάθμη και τέλος την τελική στάθμη.

Διέγερση του ατόμου

Αν το άτομο του υδρογόνου που βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση απορροφήσει ενέργεια, τότε το ηλεκτρόνιο μπορεί να μεταπηδήσει σε άλλη επιτρεπόμενη τροχιά υψηλότερης ενέργειας.

Η μετάβαση ενός ηλεκτρονίου του ατόμου από μία τροχιά χαμηλής ενέργειας σε άλλη υψηλότερης ενέργειας ονομάζεται διέγερση του ατόμου. Η ενέργεια που απαιτείται για τη διέγερση του ατόμου ονομάζεται **ενέργεια διέγερσης**.

Το διεγερμένο άτομο παραμένει στην κατάσταση διέγερσης για ελάχιστο χρονικό διάστημα (της τάξης του 10^{-8}s) και επανέρχεται στη θεμελιώδη κατάσταση. Η επάνοδος του ηλεκτρονίου στη θεμελιώδη κατάσταση μπορεί να γίνει είτε απευθείας με ένα άλμα, οπότε εκπέμπεται ένα φωτόνιο, είτε με περισσότερα διαδοχικά άλματα, οπότε εκπέμπονται τόσα φωτόνια όσα και τα άλματα που πραγματοποιεί.

Ιονισμός του ατόμου

Μερικές φορές το άτομο μπορεί να απορροφήσει τόσο μεγάλη ενέργεια, ώστε είναι δυνατό το ηλεκτρόνιό του να απομακρυνθεί από τον πυρήνα, σε περιοχή που ο πυρήνας δεν ασκεί ηλεκτρική δύναμη στο ηλεκτρόνιο. Το ηλεκτρόνιο απομακρύνεται οριστικά από τον πυρήνα και το άτομο μετατρέπεται σε θετικό ιόν. **Η απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου του ατόμου σε περιοχή εκτός του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα ονομάζεται ιονισμός του ατόμου**. Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται, για να απομακρυνθεί το ηλεκτρόνιο του ατόμου από τη θεμελιώδη τροχιά σε περιοχή εκτός του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα, ονομάζεται **ενέργεια ιονισμού**.

Η ενέργεια ιονισμού είναι ίση με:

$$E_{ιον.} = E_\infty - E_1$$

όπου $E_\infty=0$ είναι η ενέργεια του ατόμου που αντιστοιχεί σε κατάσταση με $n \rightarrow \infty$ και E_1 η ενέργειά του στη θεμελιώδη κατάσταση. Επομένως:

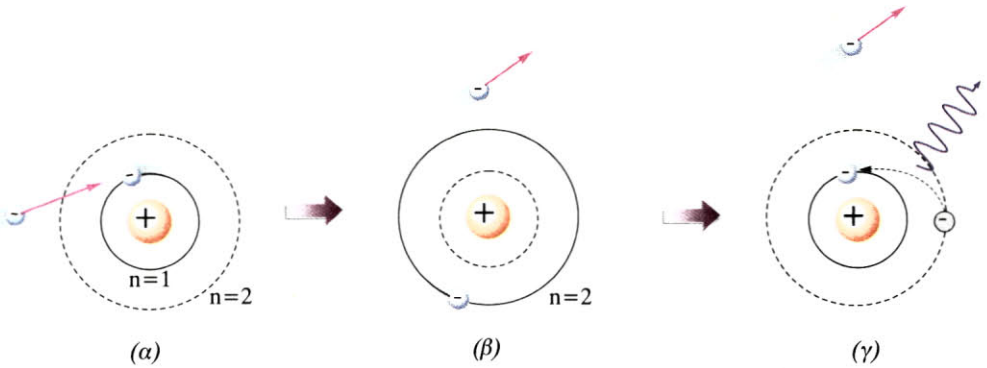
$$E_{ιον.} = - E_1$$

Για το άτομο του υδρογόνου είναι $E_1=-13,6eV$, οπότε η ενέργεια ιονισμού είναι $E_{ιον.}=13,6eV$.

2.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΦΩΤΟΝΙΩΝ

Διέγερση με κρούση

Όταν ένα σωματίδιο (π.χ. ηλεκτρόνιο, ιόν ή άτομο) συγκρουστεί με ένα άτομο υδρογόνου, που βρίσκεται, λόγου χάρη, στη θεμελιώδη κατάσταση, τότε το ηλεκτρόνιο του ατόμου μπορεί να απορροφήσει ικανή ποσότητα ενέργειας και να μεταπηδήσει σε τροχιά μεγαλύτερης ενέργειας, με αποτέλεσμα το άτομο να διεγερθεί. Το διεγερμένο άτομο επανέρχεται μετά από ελάχιστο χρόνο στη θεμελιώδη κατάσταση. Η επάνοδος μπορεί να γίνει είτε με ένα άλμα κατευθείαν στη θεμελιώδη κατάσταση, με ταυτόχρονη εκπομπή ενός φωτονίου, είτε με περισσότερα ενδιάμεσα άλματα από τροχιά σε τροχιά, με ταυτόχρονη εκπομπή περισσότερων φωτονίων.



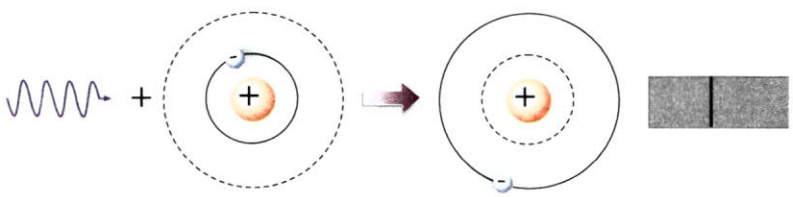
2-17 (α) Το άτομο του υδρογόνου στη θεμελιώδη κατάσταση πριν από την κρούση με το ηλεκτρόνιο.
(β) Το άτομο σε διεγερμένη κατάσταση.
(γ) Το άτομο επανέρχεται στη θεμελιώδη κατάσταση εκπέμποντας ένα φωτόνιο.

Για παράδειγμα, το ηλεκτρικό πεδίο σε σωλήνα που περιέχει αέριο χαμηλής πίεσης επιταχύνει τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα που ήδη βρίσκονται μέσα στο σωλήνα. Όταν η ενέργειά τους γίνει αρκετά μεγάλη, τότε είναι δυνατό να προκαλέσουν διέγερση των ατόμων ή των ιόντων του αερίου με τα οποία συγκρούονται.

Διέγερση με απορρόφηση ακτινοβολίας

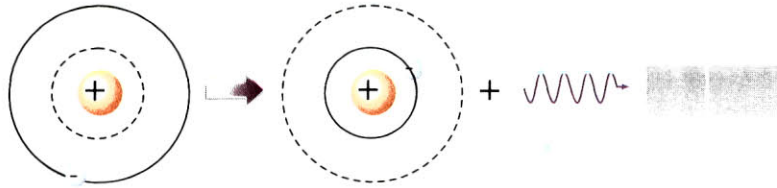
Ας θεωρήσουμε ότι ένα άτομο υδρογόνου βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση (n=1) και απορροφά ένα φωτόνιο, που έχει τόση ενέργεια όση ακριβώς απαιτείται, για να μεταπηδήσει το ηλεκτρόνιο από τη θεμελιώδη κατάσταση στην κατάσταση που αντιστοιχεί σε κβαντικό αριθμό n=2.

Μετά από ελάχιστο χρονικό διάστημα το διεγερμένο άτομο



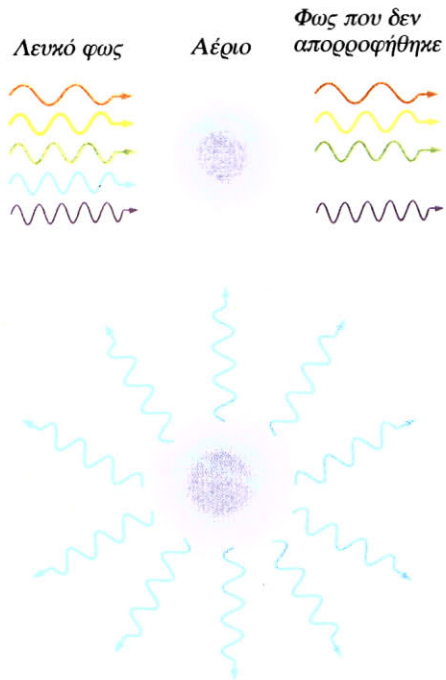
2-18 Ερμηνεία του φάσματος απορρόφησης. Το άτομο απορροφά ένα φωτόνιο και μεταβαίνει από τη θεμελιώδη κατάσταση στην πρώτη διεγερμένη κατάσταση. Η σκοτεινή γραμμή του φάσματος απορρόφησης αντιστοιχεί στο μήκος κύματος του φωτονίου που απορροφήθηκε.

επανέρχεται στην κατάσταση n=1 εκπέμποντας ένα φωτόνιο, που έχει μήκος κύματος ίσο με το μήκος κύματος του φωτονίου που απορρόφησε (σχήμα 2-19). Επομένως και οι ενέργειες των δύο φω-



2-19 Ερμηνεία του φάσματος εκπομπής. Το άτομο εκπέμπει ένα φωτόνιο και μεταβαίνει στη θεμελιώδη κατάσταση. Η φωτεινή γραμμή αντιστοιχεί στο μήκος κύματος του φωτονίου που εκπέμπεται.

τονίων είναι ίσες. Αυτός είναι ο λόγος που το φάσμα εκπομπής παρουσιάζει μία φωτεινή γραμμή στη θέση της σκοτεινής γραμμής του φάσματος απορρόφησης.



2-20 Το φως που απορροφήθηκε από το αέριο επανεκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις.

Όταν λευκό φως, το οποίο, όπως γνωρίζουμε, περιέχει όλα τα μήκη κύματος, διέρχεται μέσα από αέριο υδρογόνο, τότε το αέριο απορροφά μόνο εκείνα τα φωτόνια τα οποία έχουν μήκη κύματος που αντιστοιχούν σε μεταβάσεις μεταξύ των επιτρεπόμενων τιμών ενέργειας του ατόμου του υδρογόνου. Τα διεγερμένα άτομα του υδρογόνου επανέρχονται στη θεμελιώδη κατάσταση εκπέμποντας φωτόνια προς όλες τις κατευθύνσεις.

Συμπέρασμα:

Το αέριο απορροφά και εκπέμπει φωτόνια που έχουν ορισμένα μήκη κύματος. Τα μήκη κύματος των φωτονίων που απορροφά το αέριο είναι ίσα με τα μήκη κύματος των φωτονίων που εκπέμπει. Το φάσμα απορρόφησης του αερίου παρουσιάζει σκοτεινές γραμμές στη θέση των φωτεινών γραμμών του φάσματος εκπομπής.

Η επιτυχία και η αποτυχία του προτύπου του Bohr

Σύμφωνα με το πρότυπο του Bohr, όταν το ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου μεταβεί από αρχική τροχιά, που αντιστοιχεί σε κβαντικό αριθμό n_α, σε τελική τροχιά μικρότερης ενέργειας, που αντιστοιχεί σε κβαντικό αριθμό n_τ, τότε εκπέμπεται ένα φωτόνιο συχνότητας f, για την οποία ισχύει:

$$E_\alpha - E_\tau = h f \quad \text{ή} \quad f = \frac{E_\alpha - E_\tau}{h} \qquad (2.8)$$

Το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου φωτονίου υπολογίζεται από την εξίσωση: $c = \lambda f$.

Οι τιμές του μήκους κύματος που υπολογίζονται από την παραπάνω εξίσωση συμφωνούν με τις πειραματικές τιμές. Δηλαδή το πρότυπο του Bohr περιγράφει τα γραμμικά φάσματα του υδρογόνου.

Το πρότυπο του Bohr μπορεί να επεκταθεί και σε ιόντα που έχουν μόνο ένα ηλεκτρόνιο, όπως το (He^+), το (Li^{2+}) κ.λπ. τα οποία ονομάζονται **υδρογονοειδή**.

Το πρότυπο του Bohr δεν μπορεί να ερμηνεύσει τα γραμμικά φάσματα των ατόμων που έχουν δύο ή περισσότερα ηλεκτρόνια.

Κατά το 1920 αναπτύχθηκε μια νέα θεωρία, η κβαντομηχανική, η οποία περιγράφει με επιτυχία τα φαινόμενα που αναφέρονται στα σωματίδια του μικρόκοσμου και στο φως.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2 - 2

Να υπολογιστεί το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπει το άτομο του υδρογόνου, όταν μεταπηδά από την κατάσταση με n=6 στην κατάσταση με n=2. Η ενέργεια του ατόμου του υδρογόνου στη θεμελιώδη κατάσταση είναι E_1=-13,6eV ($h = 6{,}63 \cdot 10^{-34} J \cdot s$, $c = 3 \cdot 10^8 m/s$)

ΛΥΣΗ Το μήκος κύματος του φωτονίου που εκπέμπει το άτομο προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$E_6 - E_2 = h f$. Αντικαθιστώντας $f = \frac{c}{\lambda}$, βρίσκουμε:

$$E_6 - E_2 = h\frac{c}{\lambda} \text{ ή } \lambda = \frac{h\,c}{E_6 - E_2} \quad (1)$$

Οι ενέργειες E_2 και E_6 υπολογίζονται από τις εξισώσεις:

$$E_2 = \frac{E_1}{n^2} = \frac{E_1}{2^2} = -3{,}4\,eV = -3{,}4 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,J$$

$$E_6 = \frac{E_1}{n^2} = \frac{E_1}{6^2} = -\frac{13{,}6}{36}\,eV = -0{,}378 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,J$$

Αντικαθιστώντας στην (1) τις παραπάνω τιμές, βρίσκουμε:

$$\lambda = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{(-0{,}378 + 3{,}4) \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}}\,m = 4{,}1 \cdot 10^{-7}\,m$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2 - 3

Ένα άτομο υδρογόνου, που βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση έχει ολική ενέργεια E_1=-13,6eV:
(α) Να υπολογιστεί το μήκος κύματος ενός φωτονίου που θα προκαλέσει ιονισμό του ατόμου.
(β) Να υπολογιστεί η ελάχιστη ταχύτητα ενός ηλεκτρονίου που θα προκαλέσει, λόγω κρούσης, ιονισμό του ατόμου.

ΛΥΣΗ (α) Η ενέργεια που απαιτείται, για να απομακρυνθεί το ηλεκτρόνιο του ατόμου από τη θεμελιώδη κατάσταση στην κατάσταση $n \to \infty$, είναι:

$$E = E_\infty - E_1$$

Αντικαθιστώντας E_∞=0 και E_1=-13,6eV, βρίσκουμε:

$$E = 13{,}6\,eV$$

Η ενέργεια E που απαιτείται, για να ιονιστεί το άτομο, είναι ίση με την ενέργεια hf του φωτονίου, που προκαλεί τον ιονισμό. Άρα: $E = hf$.

Αντικαθιστώντας $f = c/\lambda$, βρίσκουμε: $E = h\frac{c}{\lambda}$, οπότε

$$\lambda = \frac{h\,c}{E} = \frac{(6{,}63 \cdot 10^{-34}\,J \cdot s)(3 \cdot 10^8\,m/s)}{13{,}6 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,J} = 0{,}91 \cdot 10^{-7}\,m$$

(β) Η ενέργεια που απαιτείται, για να ιονιστεί το άτομο, είναι ίση με την κινητική ενέργεια $\frac{1}{2}m\upsilon^2$ του ηλεκτρονίου:

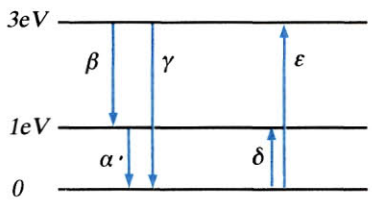
$$E = \tfrac{1}{2}m\upsilon^2 \text{ ή } \upsilon = \sqrt{\frac{2E}{m}} \text{ ή}$$

$$\upsilon = \sqrt{\frac{2 \cdot 13{,}6 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,J}{9{,}1 \cdot 10^{-31}\,kg}} = 2{,}19 \cdot 10^6\,m/s$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2 - 4

Ένα υποθετικό άτομο έχει τρεις ενεργειακές στάθμες, τη θεμελιώδη και δύο άλλες διεγερμένες στάθμες με ενέργεια 1eV και 3eV, αντίστοιχα, περισσότερη από τη θεμελιώδη: (α) Να υπολογιστούν οι συχνότητες και τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας που μπορεί να εκπέμπει το άτομο. (β) Ποια μήκη κύματος της ακτινοβολίας μπορεί να απορροφήσει το άτομο, αν βρίσκεται αρχικά στη θεμελιώδη κατάσταση; ($h = 4{,}136 \cdot 10^{-15} eV \cdot s$, $c = 3 \cdot 10^8 m/s$.)

ΛΥΣΗ (α) Στο σχήμα φαίνεται το διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών του ατόμου.



Οι δυνατές ενέργειες των εκπεμπόμενων φωτονίων αντιστοιχούν στις μεταβάσεις α, β και γ. Χρησιμοποιούμε την εξίσωση $E = hf$ για καθεμιά από τις μεταβάσεις.

Μετάβαση α: $f_\alpha = \frac{E}{h} = \frac{1eV - 0}{4{,}136 \cdot 10^{-15}\,eV \cdot s} = 2{,}42 \cdot 10^{14}\,Hz$

Μετάβαση β: $f_\beta = \frac{E}{h} = \frac{(3-1)eV}{4{,}136 \cdot 10^{-15}\,eV \cdot s} = 4{,}84 \cdot 10^{14}\,Hz$

Μετάβαση γ: $f_\gamma = \frac{E}{h} = \frac{3eV - 0}{4{,}136 \cdot 10^{-15}\,eV \cdot s} = 7{,}26 \cdot 10^{14}\,Hz$

Τα αντίστοιχα μήκη κύματος της ακτινοβολίας είναι:

$$\lambda_\alpha = \frac{c}{f_\alpha} = \frac{3\cdot 10^8\ \mathrm{m/s}}{2{,}42\cdot 10^{14}\ \mathrm{Hz}} = 1{,}24\cdot 10^{-6}\ \mathrm{m} = 1240\ \mathrm{nm}$$

$$\lambda_\beta = \frac{c}{f_\beta} = \frac{3\cdot 10^8\ \mathrm{m/s}}{4{,}84\cdot 10^{14}\ \mathrm{Hz}} = 6{,}20\cdot 10^{-7}\ \mathrm{m} = 620\ \mathrm{nm}$$

$$\lambda_\gamma = \frac{c}{f_\gamma} = \frac{3\cdot 10^8\ \mathrm{m/s}}{7{,}25\cdot 10^{14}\ \mathrm{Hz}} = 4{,}14\cdot 10^{-7}\ \mathrm{m} = 414\ \mathrm{nm}$$

(β) Από το διάγραμμα προκύπτει ότι, όταν το άτομο βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση, μπορεί να απορροφήσει μόνο φωτόνια με ενέργεια 1eV ή 3eV (μετάβαση δ και ε αντίστοιχα).
Δεν μπορεί να απορροφήσει φωτόνια ενέργειας 2eV, αφού δεν υπάρχει ενεργειακή στάθμη με ενέργεια 2eV υψηλότερη από τη θεμελιώδη. Από τους υπολογισμούς που έχουν γίνει παρατηρούμε ότι τα αντίστοιχα μήκη κύματος θα είναι 1240nm και 414nm.

2.4 ΑΚΤΙΝΕΣ Χ

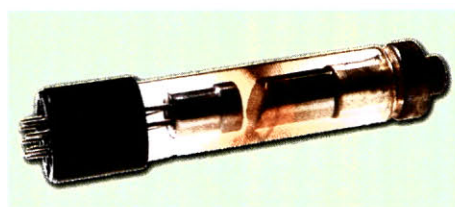
Σε πολλές περιπτώσεις ένας γιατρός, προκειμένου να κάνει διάγνωση μιας πάθησης, παραπέμπει τον ασθενή του στον ακτινολόγο, για να βγάλει μια ακτινογραφία. Όσοι έχουμε βγάλει ακτινογραφία θώρακα γνωρίζουμε ότι κατά τη λήψη της ακτινογραφίας στεκόμαστε ακίνητοι, χωρίς να αναπνέουμε, ενώ ο ακτινολόγος βγαίνει έξω από το χώρο λήψης της ακτινογραφίας. Αν στη συνέχεια παρατηρήσουμε προσεκτικά την ακτινογραφία, θα δούμε ότι τα οστά του θώρακα εμφανίζονται ως φωτεινές περιοχές, ενώ οι ιστοί ως σκοτεινές περιοχές.

Κατά τη λήψη της ακτινογραφίας μια αόρατη ακτινοβολία διαπερνά το σώμα μας. Όμως τι είναι αυτή η ακτινοβολία και πώς παράγεται;

2-21 Wilhelm Roentgen (1845-1923). Ανακάλυψε το 1895 τις ακτίνες Χ. Το 1901 τιμήθηκε με το βραβείο Nobel.

Προς το τέλος του 19ου αιώνα ο Γερμανός φυσικός Roentgen (Ρέντγκεν) μελετούσε τις ιδιότητες των ηλεκτρονίων που επιταχύνονταν, μέσα σε σωλήνα χαμηλής πίεσης, από ηλεκτρικό πεδίο και έπεφταν σε μεταλλικό στόχο. Ο Roentgen παρατήρησε ότι, όταν πλησίαζε στο σωλήνα μία φθορίζουσα ουσία, τότε η ουσία, ακτινοβολούσε φως, ενώ, όταν πλησίαζε ένα φωτογραφικό φιλμ, τότε αυτό μαύριζε. Υποστήριξε λοιπόν ότι τα φαινόμενα αυτά οφείλονταν σε ένα νέο άγνωστο και μυστηριώδη τύπο ακτίνων, τις οποίες ονόμασε ακτίνες Χ. Το σύμβολο Χ χρησιμοποιήθηκε από το Roentgen για να δηλώσει την άγνωστη μέχρι τότε φύση των ακτίνων, όπως στην Άλγεβρα το σύμβολο Χ χρησιμοποιείται για να συμβολίσει μία άγνωστη ποσότητα. Οι ακτίνες Χ ονομάζονται και ακτίνες Roentgen.

Παραγωγή ακτίνων Χ



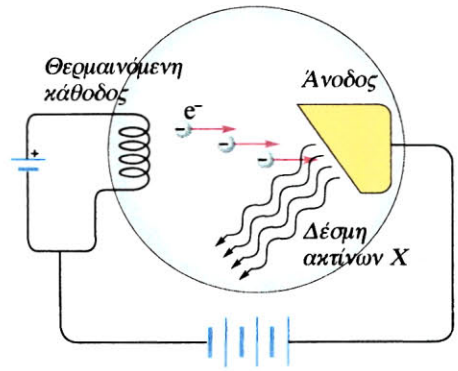
Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε από το Roentgen αποτελείται από ένα γυάλινο σωλήνα που είναι εφοδιασμένος με δύο ηλεκτρόδια, την άνοδο και την κάθοδο. Η κάθοδος θερμαίνεται και εκπέμπει ηλεκτρόνια. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία της καθό-

δου τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται στη μονάδα του χρόνου.

Μεταξύ της ανόδου και της καθόδου εφαρμόζεται υψηλή τάση, η οποία επιταχύνει τα ηλεκτρόνια. Ο σωλήνας περιέχει αέριο σε πολύ χαμηλή πίεση (της τάξης των 10^{-7}atm), ώστε να περιορίζονται οι συγκρούσεις των ηλεκτρονίων με τα μόρια του αερίου. Τα ηλεκτρόνια προσπίπτουν στην άνοδο με μεγάλη ταχύτητα.

Η άνοδος εκπέμπει μια πολύ διεισδυτική ακτινοβολία, που ονομάζεται ακτίνες Χ. Επειδή αναπτύσσεται πολύ υψηλή θερμοκρασία στην άνοδο, το υλικό της ανόδου είναι δύστηκτο μέταλλο και ψύχεται για να μη λιώνει. Επομένως:

Οι ακτίνες Χ παράγονται, όταν ηλεκτρόνια μεγάλης ταχύτητας, που έχουν επιταχυνθεί από υψηλή τάση, προσπίπτουν σε μεταλλικό στόχο.



2-22 Συσκευή παραγωγής ακτίνων Χ. Ηλεκτρόνια μεγάλης ταχύτητας προσπίπτουν σε μεταλλικό στόχο. Από το μεταλλικό στόχο εκπέμπονται ακτίνες Χ.

Φύση των ακτίνων Χ

Τα πειράματα έχουν δείξει ότι οι ακτίνες Χ είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (φωτόνια), που έχει πολύ μικρό μήκος κύματος. Το μήκος κύματος είναι 10000 φορές μικρότερο από το μήκος κύματος του ορατού φωτός και είναι συγκρίσιμο με το μέγεθος του ατόμου.

Επομένως:

Οι ακτίνες Χ είναι αόρατη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, που έχει μήκη κύματος πολύ μικρότερα από τα μήκη κύματος των ορατών ακτινοβολιών.

Φάσμα των ακτίνων Χ

Το φάσμα της ακτινοβολίας Χ είναι σύνθετο. Αποτελείται από ένα συνεχές φάσμα πάνω στο οποίο εμφανίζονται μερικές γραμμές (γραμμικό φάσμα). Τα δύο είδη φάσματος οφείλονται σε δύο διαφορετικές διεργασίες παραγωγής και εκπομπής των ακτίνων Χ.

α. Γραμμικό φάσμα

Τα κινούμενα ηλεκτρόνια συγκρούονται με τα άτομα του υλικού της ανόδου. Τα άτομα της ανόδου διεγείρονται. Ένα ηλεκτρόνιο των εσωτερικών στιβάδων του ατόμου μεταπηδά σε άλλη επιτρεπόμενη τροχιά μεγαλύτερης ενέργειας. Η κενή θέση του ηλεκτρονίου μπορεί να συμπληρωθεί από ένα ηλεκτρόνιο του ατόμου που βρίσκεται στις εξωτερικές στιβάδες, με ταυτόχρονη εκπομπή ενός φωτονίου.

Επειδή οι επιτρεπόμενες τιμές της ενέργειας του ατόμου είναι καθορισμένες, οι συχνότητες των φωτονίων που εκπέμπονται θα είναι καθορισμένες. Το φάσμα του φωτός που εκπέμπει το άτομο θα αποτελείται από γραμμές που είναι *χαρακτηριστικές του υλικού της ανόδου.*

Επειδή η ενέργεια που απαιτείται, για να εκδιωχθεί ένα ηλεκτρόνιο από μια εσωτερική τροχιά, είναι μεγάλη, θα πρέπει και η ενέργεια του ηλεκτρονίου που προκαλεί τη διέγερση να είναι μεγάλη. Επομένως απαιτείται το ηλεκτρόνιο να έχει επιταχυνθεί από μεγάλη διαφορά δυναμικού.

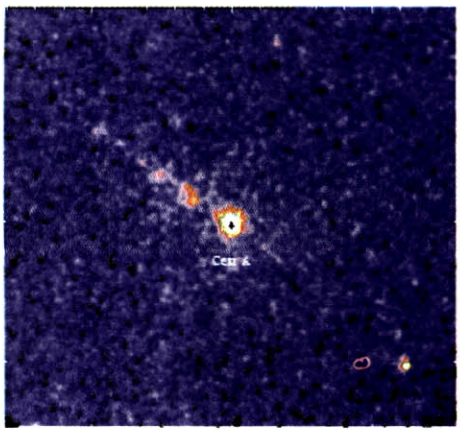
β. Συνεχές φάσμα

Ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να επιβραδυνθεί εξαιτίας της αλληλεπίδρασής του με τα άτομα του στόχου. Όπως έχουμε αναφέρει, ένα επιταχυνόμενο (ή επιβραδυνόμενο) φορτίο εκπέμπει ακτινοβολία. Η απώλεια της κινητικής ενέργειας (K_α- K_τ) του ηλεκτρονίου θα είναι ίση με την ενέργεια του φωτονίου h f που εκπέμπεται.

Δηλαδή:

$$hf = K_\alpha - K_\tau \qquad (2.9)$$

Το ηλεκτρόνιο μπορεί να χάσει όλη ή οποιοδήποτε μέρος της ενέργειάς του σε μία κρούση, δηλαδή μπορεί να ακινητοποιηθεί μετά από μία ή περισσότερες κρούσεις. Επειδή κατά τις κρούσεις των ηλεκτρονίων με τα άτομα του στόχου τα ηλεκτρόνια μπορεί να χάσουν οποιοδήποτε μέρος της ενέργειάς τους, συμπεραίνουμε ότι τα φωτόνια που εκπέμπονται θα έχουν οποιαδήποτε τιμή ενέργειας, που θα είναι μικρότερη ή ίση της αρχικής ενέργειας του ηλεκτρονίου. Επομένως το φάσμα της ακτινοβολίας αυτής θα είναι συνεχές.



2-23 Φωτογραφία με ακτίνες Χ, επεξεργασμένη με ηλεκτρονικό υπολογιστή, του πυρήνα ενός γαλαξία στον αστερισμό του Κενταύρου, όπου πιστεύουμε ότι υπάρχει μια μαύρη τρύπα. Ακτίνες Χ εκπέμπονται, καθώς η μαύρη τρύπα έλκει μεγάλες ποσότητες μάζας από τη γύρω περιοχή και αυτές αποκτούν μεγάλες επιταχύνσεις.

γ. Το μικρότερο μήκος κύματος

Το μικρότερο μήκος κύματος λ_{min} της ακτινοβολίας εκπέμπεται, όταν η ενέργεια ενός ηλεκτρονίου μετατρέπεται σε ενέργεια ενός φωτονίου σε μία μόνο κρούση. Αντικαθιστώντας K_τ=0 στην παραπάνω σχέση 2.9, βρίσκουμε:

$$h\,f = K_\alpha \qquad (2.10)$$

Η κινητική ενέργεια K_α του ηλεκτρονίου είναι ίση με την ενέργεια eV που αποκτά μέσω της τάσης V που το επιταχύνει. Αντικαθιστώντας K_α=eV στην παραπάνω σχέση, παίρνουμε:

hf=eV και επειδή $f = \dfrac{c}{\lambda_{min}}$, βρίσκουμε:

$$h\frac{c}{\lambda_{min}} = eV \text{, οπότε } \quad \lambda_{min} = \frac{ch}{eV} \qquad (2.11)$$

Παρατηρούμε ότι το ελάχιστο μήκος κύματος εξαρτάται μόνο από την τάση V που εφαρμόζεται μεταξύ της ανόδου και της καθόδου.

Απορρόφηση των ακτίνων Χ

Όταν οι ακτίνες Χ διαπερνούν οποιοδήποτε υλικό, τότε ένα μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται από το υλικό. Η απορρόφηση της ακτινοβολίας εξαρτάται από τη **φύση** του υλικού, το **μήκος κύματος** της ακτινοβολίας και το **πάχος** του υλικού.

α. Όσο μεγαλύτερος είναι ο ατομικός αριθμός Z των ατόμων του υλικού που απορροφά την ακτινοβολία τόσο μεγαλύτερη είναι η απορρόφηση της ακτινοβολίας. Το γεγονός αυτό εξηγεί γιατί στις ακτινογραφίες του ανθρώπινου σώματος τα οστά, τα οποία αποτελούνται από άτομα μεγαλύτερου ατομικού αριθμού, απορροφούν περισσότερη ακτινοβολία, ενώ οι ιστοί απορροφούν πολύ λιγότερη.

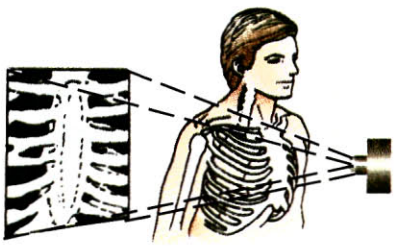
β. Όταν οι ακτίνες Χ διαπερνούν μια πλάκα, που έχει ορισμένο πάχος, τότε η απορρόφηση των ακτίνων αυξάνεται όσο αυξάνεται το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Οι ακτίνες Χ που έχουν μικρά μήκη κύματος είναι περισσότερο διεισδυτικές και ονομάζονται **σκληρές ακτίνες**, ενώ οι ακτίνες που έχουν μεγάλα μήκη κύματος είναι λιγότερο διεισδυτικές και ονομάζονται **μαλακές ακτίνες**.

γ. Όσο το πάχος του υλικού είναι μεγαλύτερο τόσο μεγαλύτερη είναι και η απορρόφηση της ακτινοβολίας μέσα στο υλικό αυτό.

Χρήσεις των ακτίνων Χ

Στην Ιατρική

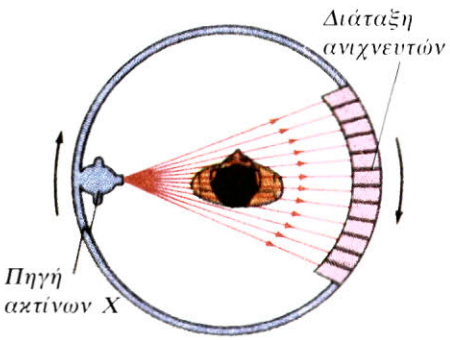
α. Ακτινογραφία - Ακτινοσκόπηση. Όπως έχουμε αναφέρει, η απορρόφηση των ακτίνων Χ εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό των χημικών στοιχείων του υλικού που τις απορροφά. Τα βαριά χημικά στοιχεία έχουν μεγάλο ατομικό αριθμό και απορροφούν περισσότερο την ακτινοβολία από ό,τι τα ελαφρά στοιχεία, τα οποία έχουν μικρό ατομικό αριθμό. Στην ιδιότητα αυτή στηρίζεται η χρήση των ακτίνων Χ στη διάγνωση πολλών παθήσεων. Τα οστά περιέχουν στοιχεία μεγάλου ατομικού αριθμού (ασβέστιο, φώσφορος) και απορροφούν περισσότερο τις ακτίνες από ό,τι οι ιστοί, οι οποίοι αποτελούνται από ελαφρότερα στοιχεία (άνθρακας, οξυγόνο, υδρογόνο, άζωτο και άλλα).



2-24 Ακτινογραφία. Τα οστά απορροφούν εντονότερα τις ακτίνες Χ σε σύγκριση με τον υπόλοιπο ιστό. Έτσι στο φιλμ εμφανίζονται ως φωτεινότερες περιοχές.

Αν λοιπόν μεταξύ της πηγής των ακτίνων Χ και μιας φθορίζουσας οθόνης τοποθετηθεί ο προς εξέταση ασθενής, τότε πάνω στην οθόνη θα φανούν οι σκιές των διάφορων οργάνων (ακτινοσκόπηση). Αν στη θέση της φθορίζουσας οθόνης τοποθετηθεί μια φωτογραφική πλάκα, τότε θα πάρουμε πάνω στην πλάκα την ανάλογη φωτογραφία (ακτινογραφία).

β. Αυτοματοποιημένη αξονική τομογραφία. Τελευταία χρησιμοποιείται η αυτοματοποιημένη αξονική τομογραφία. Η πηγή των ακτίνων Χ παράγει μια αποκλίνουσα δέσμη, που έχει μορφή βεντάλιας. Οι ακτίνες της δέσμης διαπερνούν το ανθρώπινο σώμα και, όταν εξέρχονται από την άλλη πλευρά του σώματος, ανιχνεύονται με διάταξη ανιχνευτών. Κάθε ανιχνευτής μετράει την απορρόφηση μιας λεπτής δέσμης, που διαπερνά το σώμα. Η συσκευή περιστρέφεται γύρω από το ανθρώπινο σώμα και ένας υπολογιστής επεξεργάζεται τις πληροφορίες.



2-25 Αρχή λειτουργίας αξονικού τομογράφου. Οι ακτίνες Χ, που περνούν μέσα από το σώμα, μετρούνται συγχρόνως σε κάθε διεύθυνση. Η πηγή και ο ανιχνευτής περιστρέφονται, ώστε να έχουμε μετρήσεις σε διαφορετικές γωνίες.

Με αυτό τον τρόπο μπορούν να ανιχνευτούν όγκοι ή άλλες ανωμαλίες που είναι πολύ μικροί και δεν μπορούν να παρατηρηθούν με την ακτινογραφία.

Στη βιομηχανία

Οι ακτίνες Χ χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, για να διαπιστωθεί η ύπαρξη κοιλοτήτων, ραγισμάτων ή άλλων ελαττωμάτων στο εσωτερικό των μεταλλικών αντικειμένων. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ίδια με τη διαδικασία της ακτινοδιαγνωστικής. Τα ελαττωματικά σημεία εντοπίζονται από το γεγονός ότι προκαλούν μικρότερη απορρόφηση.

Βιολογικές βλάβες που προκαλούν οι ακτίνες Χ

Οι ακτίνες Χ προκαλούν βλάβες στους οργανισμούς. Όταν απορροφηθούν από τους ιστούς, διασπούν τους μοριακούς δεσμούς και δημιουργούν ενεργές ελεύθερες ρίζες, που με τη σειρά τους μπορεί να διαταράξουν τη μοριακή δομή των πρωτεϊνών και ειδικά του γενετικού υλικού (DNA).

Αν το κύτταρο που έχει υποστεί βλάβη από την ακτινοβολία επιβιώσει, τότε μπορεί να δώσει πολλές γενεές μεταλλαγμένων κυττάρων. Αν οι αλλαγές στο DNA αφορούν γονίδια που ελέγχουν το ρυθμό πολλαπλασιασμού των κυττάρων, οι ακτίνες Χ μπορεί να προκαλέσουν καρκίνο. Η υπερβολική έκθεση ενός οργανισμού σε ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στα γενετικά κύτταρα. Σ' αυτή την περίπτωση, ενώ ο ίδιος οργανισμός δε θα εμφανίσει κάποια βλάβη, θα επηρεαστούν οι απόγονοί του.

Η χρήση των ακτίνων Χ για διαγνωστικούς και θεραπευτικούς σκοπούς πρέπει να γίνεται με **προσοχή**, εκτιμώντας τόσο τα οφέλη όσο και τους κινδύνους που προέρχονται από την έκθεση του οργανισμού σε ακτινοβολία για μεγάλο χρονικό διάστημα.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2 - 5

Τα ηλεκτρόνια σε ένα σωλήνα ακτίνων Χ επιταχύνονται με διαφορά δυναμικού 50kV. Αν ένα ηλεκτρόνιο παράγει ένα φωτόνιο κατά την πρόσκρουσή του στο στόχο, να υπολογιστεί το ελάχιστο μήκος κύματος των ακτίνων Χ που παράγονται.

ΛΥΣΗ Το ελάχιστο μήκος κύματος αντιστοιχεί στη μέγιστη ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου hf_{max}. Αυτό συμβαίνει, όταν όλη η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου eV χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενός φωτονίου.

Έχουμε λοιπόν:

$$eV = hf_{max} \quad \text{και επειδή} \quad c = \lambda_{min} f_{max} \quad \text{ή} \quad f_{max} = \frac{c}{\lambda_{min}}$$

βρίσκουμε $eV = h\dfrac{c}{\lambda_{min}}$ ή

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eV} = \frac{(6{,}63\cdot 10^{-34}\,J\cdot s)(3\cdot 10^{8}\,m/s)}{(1{,}6\cdot 10^{-19}C)(50\cdot 10^{3}V)} = 2{,}5\cdot 10^{-11}m$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2 - 6

Σε μια ακτινογραφία απαιτούνται ακτίνες Χ με μήκος κύματος $\lambda = 1{,}5\cdot 10^{-11}\,m$. Η ένταση του ρεύματος της δέσμης των ηλεκτρονίων είναι I=40mA και ο χρόνος λήψης της ακτινογραφίας είναι t=0,1s.

Να υπολογιστούν:

α. Η τάση που πρέπει να εφαρμοστεί μεταξύ της ανόδου και της καθόδου.

β. Η ισχύς και η ενέργεια που μεταφέρει η δέσμη των ηλεκτρονίων.

γ. Ο αριθμός των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν στην άνοδο. (Θεωρούμε ότι όλη η ενέργεια κάθε ηλεκτρονίου μετατρέπεται σε ενέργεια ενός φωτονίου.)

ΛΥΣΗ α. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας έχει ενέργεια hf ή hc/λ. Η ενέργεια του φωτονίου είναι ίση με την κινητική ενέργεια που απέκτησε το ηλεκτρόνιο εξαιτίας της επιτάχυνσής του μέσω της τάσης V. Άρα:

$$eV = h\frac{c}{\lambda} \quad \text{ή} \quad V = \frac{hc}{\lambda e}$$

$$V = \frac{(6{,}6\cdot 10^{-34}\,J\cdot s)(3\cdot 10^{8}\,m/s)}{(1{,}6\cdot 10^{-19}C)(1{,}5\cdot 10^{-11}m)} \quad \text{ή} \quad V=82500V$$

β. Η ισχύς που μεταφέρει η δέσμη των ηλεκτρονίων είναι:

$$P = V\cdot I = 82500\cdot 40\cdot 10^{-3}W = 3300\,W$$

Η ενέργεια που μεταφέρει η δέσμη είναι:

$$W = P\cdot t = 3300\cdot 0{,}1\,J = 330\,J$$

γ. Το φορτίο q που προσπίπτει στην άνοδο σε χρόνο t είναι:

$$q = I\cdot t = 40\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}1C = 4\cdot 10^{-3}C$$

και ο αριθμός των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν στην άνοδο είναι:

$$N = \frac{q}{e} = \frac{4\cdot 10^{-3}C}{1{,}6\cdot 10^{-19}C} = 2{,}5\cdot 10^{16}\ \text{ηλεκτρόνια}$$

ΣΥΝΟΨΗ 2ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

❑ Σύμφωνα με το πρότυπο του Thomson, το άτομο αποτελείται από μία σφαίρα ομοιόμορφα κατανεμημένου θετικού φορτίου, μέσα στην οποία είναι ενσωματωμένα τα ηλεκτρόνια.

❑ Σύμφωνα με το πρότυπο του Rutherford, το άτομο αποτελείται:
i. από μια μικρή περιοχή (πυρήνας), στην οποία είναι συγκεντρωμένο όλο το θετικό φορτίο και όλη σχεδόν η μάζα του ατόμου,
ii. από τα ηλεκτρόνια, τα οποία κινούνται σε κυκλικές τροχιές γύρω από τον πυρήνα.

❑ Το υδρογόνο, όπως και όλα τα αέρια, μπορεί να εκπέμπει μόνο ορισμένες ακτινοβολίες και να απορροφά μόνο εκείνες τις ακτινοβολίες τις οποίες μπορεί να εκπέμπει.

❑ Για να ερμηνεύσει ο Bohr το φάσμα του υδρογόνου, διατύπωσε τις παρακάτω ιδέες:
i. Το ηλεκτρόνιο στο άτομο του υδρογόνου μπορεί να κινείται μόνο σε ορισμένες επιτρεπόμενες τροχιές, για τις οποίες η στροφορμή του είναι $m\upsilon r = n\cdot(h/2\pi) = n\hbar$ (n=1, 2, 3, ... , ∞).
ii. Αν το ηλεκτρόνιο του ατόμου μεταπηδήσει από μία επιτρεπόμενη τροχιά ενέργειας E_α σε άλλη τροχιά μικρότερης ενέργειας E_τ, τότε το άτομο εκπέμπει ένα φωτόνιο συχνότητας f και ισχύει: $E_\alpha - E_\tau = hf$.

❑ Η ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου του ατόμου του υδρογόνου δίνεται από τη σχέση: $E = -k\dfrac{e^2}{2r}$

❑ Οι ακτίνες των επιτρεπόμενων τροχιών και οι αντίστοιχες τιμές της ολικής ενέργειας του ηλεκτρονίου δίνονται από τις σχέσεις:

$$r_n = n^2 r_1 \text{ και } E_n = \frac{E_1}{n^2} \quad (n=1, 2, 3, \ldots, \infty).$$

❑ Οι επιτρεπόμενες τιμές της ενέργειας ονομάζονται ενεργειακές στάθμες. Οι αντίστοιχες καταστάσεις του ατόμου ονομάζονται ενεργειακές καταστάσεις. Η κατάσταση με τη χαμηλότερη ενέργεια E_1 ονομάζεται θεμελιώδης κατάσταση. Όλες οι άλλες ενεργειακές καταστάσεις E_2, E_3, ... ονομάζονται διεγερμένες καταστάσεις.

❑ Η μετάβαση ενός ηλεκτρονίου του ατόμου από μία τροχιά χαμηλής ενέργειας σε άλλη υψηλότερης ενέργειας ονομάζεται διέγερση του ατόμου. Η απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου του ατόμου σε περιοχή εκτός του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα ονομάζεται ιονισμός του ατόμου.

❑ Οι ακτίνες Χ παράγονται, όταν ηλεκτρόνια μεγάλης ταχύτητας, που έχουν επιταχυνθεί από υψηλή τάση, προσπίπτουν σε μεταλλικό στόχο. Είναι αόρατη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, που έχει μήκη κύματος πολύ μικρότερα από τα μήκη κύματος των ορατών ακτινοβολιών.

❑ Το φάσμα των ακτίνων Χ είναι σύνθετο. Αποτελείται από ένα συνεχές φάσμα πάνω στο οποίο εμφανίζονται μερικές γραμμές (γραμμικό φάσμα).

❑ Το μικρότερο μήκος κύματος λ_{min} των ακτίνων Χ εκπέμπεται, όταν το ηλεκτρόνιο δίνει όλη την κινητική του ενέργεια σε ένα φωτόνιο σε μία μόνο κρούση. Το μικρότερο μήκος κύματος δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda_{min} = \frac{c\,h}{e\,V}$$

❑ Οι ακτίνες Χ προκαλούν βιολογικές βλάβες.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Ποιο είναι το πρότυπο του Thomson για το άτομο;

2. Ποιο είναι το πρότυπο του Rutherford για το άτομο;

3. Όταν μία δέσμη σωματίων α κατευθύνεται σε λεπτό μεταλλικό φύλλο στόχου, τότε παρατηρούμε ότι:

I. τα περισσότερα σωμάτια α περνάνε ανεπηρέαστα μέσα από το στόχο,

II. αρκετά σωμάτια α αποκλίνουν σε διάφορες γωνίες, ενώ λίγα αποκλίνουν κατά 180°.

Ποια από τις παραπάνω παρατηρήσεις δείχνει ότι:

α. Ο χώρος μέσα στο άτομο είναι σχεδόν κενός.

β. Το θετικό φορτίο του ατόμου είναι συγκεντρωμένο στο κέντρο του ατόμου.

γ. Το κέντρο του ατόμου είναι θετικά φορτισμένο.

4. Να εξηγήσετε γιατί το πρότυπο του Rutherford αδυνατεί να ερμηνεύσει τα γραμμικά φάσματα των αερίων.

5. Να διατυπώσετε το πρότυπο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου.

6. Να υπολογίσετε την κινητική, τη δυναμική και την ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου του ατόμου του υδρογόνου σε συνάρτηση με την ακτίνα της τροχιάς του.

7. Να σχεδιάσετε το διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών για το άτομο του υδρογόνου.

8. Τι ονομάζεται:

α. διέγερση,

β. ιονισμός,

γ. ενέργεια διέγερσης και

δ. ενέργεια ιονισμού;

9. Να περιγράψετε το μηχανισμό διέγερσης του ατόμου:

α. λόγω κρούσης και

β. λόγω απορρόφησης ακτινοβολίας.

10. Ποια γραμμικά φάσματα μπορεί να ερμηνεύσει το πρότυπο του Bohr και ποια δεν μπορεί;

11. Πώς παράγονται οι ακτίνες Χ;

12. Πώς ερμηνεύεται το γραμμικό φάσμα των ακτίνων Χ και πώς το συνεχές φάσμα;

13. Να υπολογιστεί το ελάχιστο μήκος κύματος των ακτίνων Χ.

14. Από ποιους παράγοντες εξαρτάται η απορρόφηση των ακτίνων Χ και με ποιο τρόπο;

15. Ποια είναι η φύση των ακτίνων Χ;

16. Πού χρησιμοποιούνται οι ακτίνες Χ;

17. Ποιες είναι οι βιολογικές βλάβες που προκαλούν οι ακτίνες Χ;

18. Πώς επηρεάζονται οι ακτίνες Χ:

α. από τη θερμοκρασία της καθόδου,

β. από την τάση που εφαρμόζεται μεταξύ της ανόδου και της καθόδου,

γ. από το υλικό της ανόδου;

(Στις ερωτήσεις πολλαπλής επιλογής που ακολουθούν να κυκλώσετε το γράμμα που αντιστοιχεί στη σωστή απάντηση.)

19. Το ηλεκτρόνιο στο άτομο του υδρογόνου, το οποίο βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση:

α. έχει απομακρυνθεί από το άτομο.

β. ηρεμεί.

γ. είναι σε τροχιά με τη χαμηλότερη ενέργεια.

δ. είναι σε τροχιά με την υψηλότερη ενέργεια.

20. Ένα άτομο εκπέμπει ένα φωτόνιο, όταν ένα από τα ηλεκτρόνιά του:

α. απομακρύνεται από το άτομο.

β. μεταβαίνει σε τροχιά μικρότερης ενέργειας.

γ. μεταβαίνει σε τροχιά μεγαλύτερης ενέργειας.

δ. περιφέρεται σε επιτρεπόμενη τροχιά.

21. Το γραμμικό φάσμα εκπομπής αερίου περιέχει μήκη κύματος που είναι:

α. ίδια για όλα τα στοιχεία.

β. χαρακτηριστικά του στοιχείου που το εκπέμπει.

γ. διαφορετικά από τα μήκη κύματος του φάσματος απορρόφησης του ίδιου στοιχείου.

δ. στην περιοχή του ορατού.

22. Ποιο από τα παρακάτω πειραματικά δεδομένα δείχνει την ύπαρξη διακριτών ενεργειακών σταθμών στα άτομα;

α. Το φάσμα εκπομπής ενός στοιχείου περιέχει φωτεινότερες γραμμές σε μεγαλύτερη θερμοκρασία.

β. Το φάσμα απορρόφησης ενός στοιχείου έχει σκοτεινές γραμμές στις θέσεις που αντιστοιχούν στις φωτεινές γραμμές του φάσματος εκπομπής.

γ. Το φάσμα των ακτίνων Χ παρουσιάζει ένα ελάχιστο μήκος κύματος.

23. Ποια από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστή;

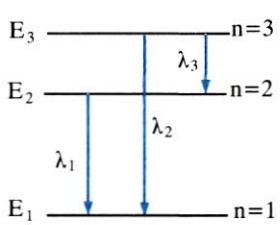
α. Η ενέργεια ιονισμού είναι μικρότερη από την ενέργεια διέγερσης.

β. Η ενέργεια ενός φωτονίου είναι hλ, όπου λ είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.

γ. Ένα ηλεκτρόνιο που βρίσκεται σε διεγερμένη ενεργειακή στάθμη ακτινοβολεί συνεχώς ενέργεια.

δ. Η θεμελιώδης κατάσταση του ατόμου του υδρογόνου είναι η κατάσταση στην οποία το ηλεκτρόνιο βρίσκεται στη χαμηλότερη επιτρεπτή ενεργειακή στάθμη.

24. Το σχήμα δείχνει το διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών του ατόμου του υδρογόνου. Τα μήκη κύματος λ_1, λ_2, λ_3 είναι τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται κατά τις μεταβάσεις του ηλεκτρονίου μεταξύ των ενεργειακών σταθμών, όπως δείχνουν τα βέλη. Ποια από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστή;



α. $\lambda_2 = \lambda_1 + \lambda_3$

β. $\lambda_2 > \lambda_3$

γ. $f_2 = f_1 + f_3$

δ. $f_2 = \dfrac{f_1 f_3}{f_1 + f_3}$

25. Το φάσμα απορρόφησης ενός αερίου εμφανίζει μια συνεχή χρωματιστή ταινία που διακόπτεται από σκοτεινές γραμμές:

α. Οι θέσεις των σκοτεινών γραμμών είναι χαρακτηριστικές του στοιχείου.

β. Μπορεί δύο διαφορετικά στοιχεία να έχουν το ίδιο φάσμα απορρόφησης.

γ. Οι σκοτεινές γραμμές δημιουργούνται, γιατί το λευκό φως απορροφά την ακτινοβολία που εκπέμπει το αέριο.

δ. Οι θέσεις των σκοτεινών γραμμών εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του αερίου.

26. Το γραμμικό φάσμα των ακτίνων Χ αποτελείται από δύο γραμμές που αντιστοιχούν σε μήκη κύματος λ_1 και λ_2 αντίστοιχα. Οι γραμμές αυτές θα μετατοπιστούν, αν αλλάξουμε:

α. το υλικό της ανόδου.

β. την τάση μεταξύ της ανόδου και της καθόδου.

γ. τη θερμοκρασία της καθόδου.

δ. τη θερμοκρασία της ανόδου.

27. Το ελάχιστο μήκος κύματος λ_{min} του συνεχούς φάσματος των ακτίνων Χ θα μεταβληθεί, αν μεταβάλλουμε:

α. το υλικό της ανόδου.

β. τη θερμοκρασία της καθόδου.

γ. τη διαφορά δυναμικού μεταξύ της ανόδου και της καθόδου.

δ. τη θερμοκρασία της ανόδου.

Θεωρούμε ότι τα ηλεκτρόνια ξεκινούν από την κάθοδο με μηδενική ταχύτητα.

28. Σύμφωνα με το πρότυπο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου:

α. το ηλεκτρόνιο εκπέμπει συνεχώς ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

β. η στροφορμή του ηλεκτρονίου μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή.

γ. το άτομο αποτελείται από μία σφαίρα θετικού φορτίου ομοιόμορφα κατανεμημένου.

δ. το ηλεκτρόνιο κινείται μόνο σε επιτρεπτές τροχιές.

29. Ποιες από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστές και ποιες λανθασμένες;

α. Σύμφωνα με το πρότυπο του Rutherford τα άτομα θα έπρεπε να εκπέμπουν συνεχές και όχι γραμμικό φάσμα.

β. Ο Thomson πρότεινε το λεγόμενο πλανητικό μοντέλο για το άτομο.

γ. Σύμφωνα με το πρότυπο του Bohr, το ηλεκτρόνιο στο άτομο του υδρογόνου, εκπέμπει ακτινοβολία όταν κινείται σε επιτρεπόμενη τροχιά.

δ. Το σωμάτιο α είναι ένας πυρήνας ηλίου ($^{4}_{2}He$).

30. Ποιες από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστές και ποιες λανθασμένες;
Στο πρότυπο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου:

α. Η ακτίνα της νιοστής τροχιάς του ηλεκτρονίου είναι ανάλογη του n^2.

β. Η ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου στη νιοστή τροχιά είναι αντιστρόφως ανάλογη του κύριου κβαντικού αριθμού n.

γ. Η στροφορμή του ηλεκτρονίου είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του h/2π.

δ. Το μέτρο της δυναμικής ενέργειας του ηλεκτρονίου σε μια τροχιά είναι μεγαλύτερο από την κινητική του ενέργεια.

31. Στο πρότυπο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου ο λόγος της κινητικής ενέργειας του ηλεκτρονίου σε μια τροχιά προς την ολική ενέργεια, είναι:

α. -1 β. 1 γ. 1/2 δ. 2

32. Η ενέργεια ιονισμού του ατόμου του υδρογόνου είναι 13,6eV. Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για να διεγερθεί το άτομο του υδρογόνου από τη θεμελιώδη κατάσταση είναι:

α. 3,4eV γ. -13,6eV

β. 13,6eV δ. 10,2eV

33. Το ελάχιστο μήκος κύματος των ακτίνων X εξαρτάται:

α. από την ένταση του ρεύματος.

β. από την τάση που εφαρμόζεται ματαξύ της ανόδου και της καθόδου.

γ. από τη φύση του αερίου που περιέχεται στο σωλήνα παραγωγής των ακτίνων X.

δ. από το υλικό της ανόδου.

ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Οι παρακάτω φυσικές σταθερές θεωρούνται γνωστές:
Σταθερά του νόμου Coulomb . . . $k = 9 \cdot 10^9\ Nm^2/C^2$
Φορτίο ηλεκτρονίου . . . . . $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ C$
Μάζα ηλεκτρονίου . . . . . $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}\ kg$
Σταθερά του Planck . . . . . $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s$
Ταχύτητα του φωτός στο κενό. . $c = 3 \cdot 10^8\ m/s$
$1eV = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ J$

1. Το άτομο του υδρογόνου βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση. Η ακτίνα της τροχιάς του ηλεκτρονίου είναι $r = 5{,}3 \times 10^{-11}m$. Να υπολογιστούν:
α. η ταχύτητα του ηλεκτρονίου,
β. η περίοδος της κίνησης του ηλεκτρονίου,
γ. η κινητική, η δυναμική και η ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου.

2. Η ενέργεια του ατόμου του υδρογόνου, όταν αυτό βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση, είναι -13,6eV:
α. Ποια θα είναι η ενέργεια του ατόμου στην πρώτη διεγερμένη κατάσταση (n=2) και ποια στη δεύτερη διεγερμένη κατάσταση (n=3);
β. Το άτομο διεγείρεται και αποκτά ενέργεια -0,85eV. Σε ποιο κύριο κβαντικό αριθμό αντιστοιχεί η διεγερμένη αυτή κατάσταση;

3. Η ενέργεια του ατόμου του υδρογόνου, όταν βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση, είναι -13,6eV. Ηλεκτρόνια συγκρούονται με άτομα του υδρογόνου τα οποία βρίσκονται στη θεμελιώδη κατάσταση. Τα άτομα διεγείρονται και εκπέμπουν γραμμικό φάσμα που αποτελείται μόνο από μία γραμμή ορισμένης συχνότητας. Ποια είναι η ελάχιστη και ποια η μέγιστη ενέργεια των ηλεκτρονίων που διεγείρουν τα άτομα του υδρογόνου; (Η ορμή του ατόμου δε μεταβάλλεται κατά την κρούση.)

4. Διεγερμένα άτομα υδρογόνου βρίσκονται σε κατάσταση που αντιστοιχεί σε κβαντικό αριθμό n=4:
α. Να υπολογιστεί το πλήθος των γραμμών του φάσματος εκπομπής του αερίου.
β. Να σχεδιαστεί το διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών, στο οποίο να φαίνονται οι μεταβάσεις που πραγματοποιούνται.

5. Το άτομο του υδρογόνου βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση στην οποία η ολική ενέργεια είναι -13,6eV:
α. Ποια ελάχιστη ενέργεια απαιτείται, για να ιονιστεί το άτομο;
β. Ποια ενέργεια απαιτείται, για να διεγερθεί το άτομο στην πρώτη διεγερμένη κατάσταση (n=2);
γ. Το άτομο του υδρογόνου απορροφά, λόγω κρούσης, ενέργεια 15eV και ιονίζεται. Ποια κινητική ενέργεια αποκτά τελικά το ηλεκτρόνιο, αν η κινητική ενέργεια του ατόμου δε μεταβάλλεται κατά την κρούση;

6. Ηλεκτρόνια επιταχύνονται μέσω τάσης 12,3V και περνάνε μέσα από αέριο που αποτελείται από άτομα υδρογόνου τα οποία βρίσκονται στη θεμελιώδη κατάσταση. Να υπολογιστούν τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπει το αέριο. Η ενέργεια του ατόμου του υδρογόνου στη θεμελιώδη κατάσταση είναι -13,6eV.

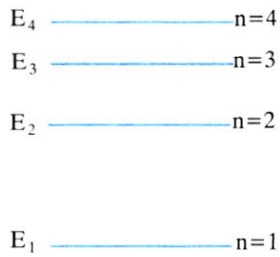
7. Σε σωλήνα παραγωγής ακτίνων Χ τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται από τάση 10kV. Να υπολογιστεί η μέγιστη συχνότητα και το ελάχιστο μήκος κύματος των ακτίνων Χ που παράγονται.

8. Σε σωλήνα παραγωγής ακτίνων Χ εφαρμόζεται τάση (α) $V_1 = 10kV$, (β) $V_2 = 40kV$. Τα αντίστοιχα ελάχιστα μήκη κύματος των ακτίνων Χ είναι λ_1 και λ_2. Να υπολογιστεί ο λόγος λ_1/λ_2.

9. Σε μια ακτινογραφία απαιτούνται ακτίνες Χ μήκους κύματος $\lambda = 10^{-10}m$. Η ένταση του ρεύματος της δέσμης των ηλεκτρονίων είναι 40mA και ο χρόνος λήψης της ακτινογραφίας είναι 0,1s. Θεωρούμε ότι όλη η κινητική ενέργεια κάθε ηλεκτρονίου μετατρέπεται σε ενέργεια ενός φωτονίου:
α. Ποια τάση εφαρμόζεται στο σωλήνα παραγωγής ακτίνων Χ;
β. Πόση ισχύ και πόση ενέργεια μεταφέρει η ηλεκτρονική δέση;
γ. Ποια είναι η ταχύτητα των ηλεκτρονίων τη στιγμή που προσπίπτουν στην άνοδο;
δ. Πόσα ηλεκτρόνια ανά δευτερόλεπτο προσπίπτουν στην άνοδο;

ε. Η ισχύς της ακτινοβολίας Χ αν η απόδοση της συσκευής σε ακτίνες Χ είναι 2%.
στ. Η ενέργεια που μεταφέρεται από την ακτινοβολία σε χρονικό διάστημα $\Delta t=0,1s$.
ζ. Η μεταβολή επί τοις % στην τιμή της ανοδικής τάσης, αν θέλουμε το ελάχιστο μήκος κύματος του συνεχούς φάσματος να ελαττωθεί κατά 20%. (Θεωρούμε ότι όλη η ενέργεια κάθε ηλεκτρονίου μετατρέπεται σε ενέργεια ενός φωτονίου.)

10. Ένα άτομο υδρογόνου βρίσκεται στη θεμελιώδη του κατάσταση (n=1) με ενέργεια $E_1=-13,6eV$.
Στο σχήμα δίνεται το διάγραμμα των τεσσάρων πρώτων ενεργειακών σταθμών του ατόμου του υδρογόνου.



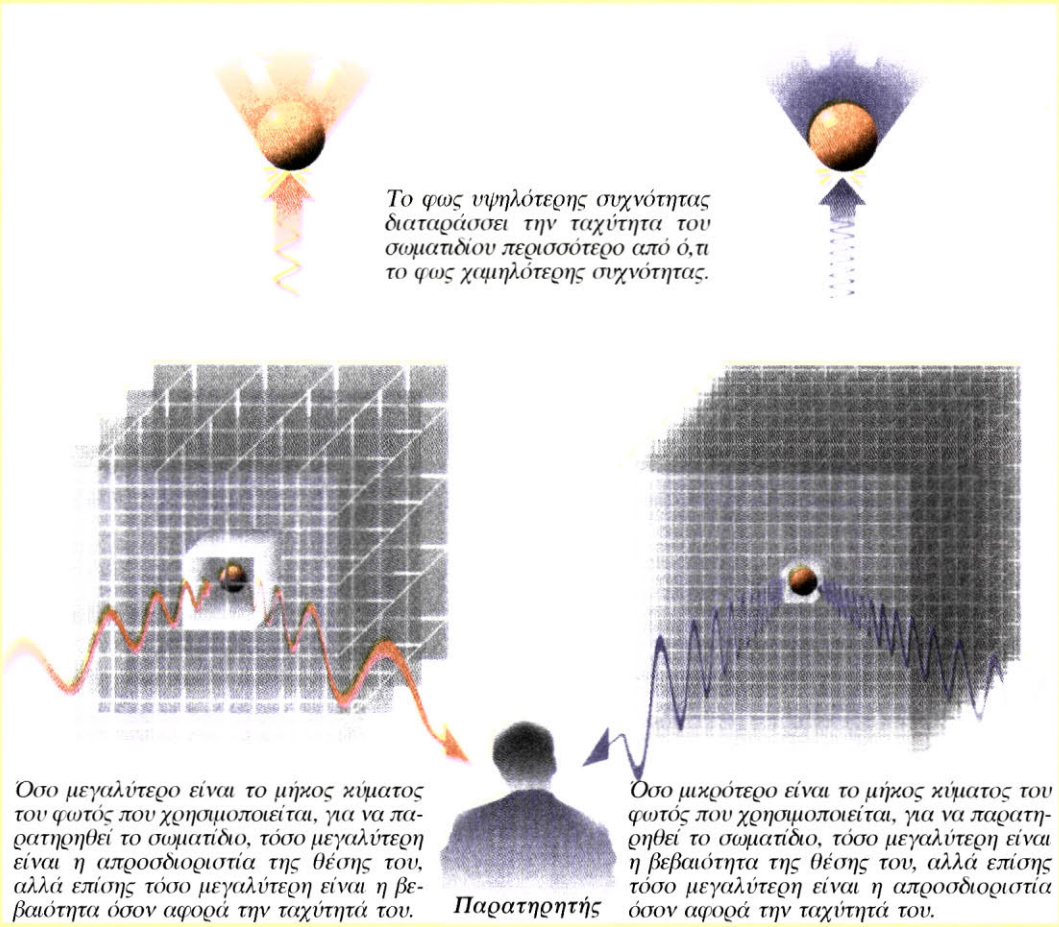
α. Να υπολογίσετε την ενέργεια κάθε διεγερμένης κατάστασης (n=2, n=3, n=4).
β. Ένα σωματίδιο με κινητική ενέργεια $K_1=13eV$ συγκρούεται με το παραπάνω άτομο υδρογόνου. Το άτομο απορροφά τμήμα της κινητικής ενέργειας του σωματιδίου και διεγείρεται στην ενεργειακή στάθμη με κύριο κβαντικό αριθμό n=3. Να υπολογίσετε την τελική κινητική ενέργεια του σωματιδίου.
γ. Το διεγερμένο άτομο, μετά από ελάχιστο χρονικό διάστημα, επανέρχεται στη θεμελιώδη του κατάσταση. Να μεταφέρετε το σχήμα των ενεργειακών σταθμών στο τετραδιό σας και να σχεδιάσετε τις δυνατές μεταβάσεις του ηλεκτρονίου από τη διεγερμένη κατάσταση στη θεμελιώδη κατάσταση.
δ. Σε μια από τις παραπάνω μεταβάσεις εκπέμπεται ακτινοβολία με τη μεγαλύτερη συχνότητα. Να υπολογίσετε τη συχνότητα αυτή.

11. Διεγερμένα άτομα υδρογόνου αποδιεγείρονται και τα άτομα επανέρχονται στη θεμελιώδη κατάσταση. Η ενέργεια της θεμελιώδους κατάστασης είναι $E_1=-13,6eV$. Από τη μελέτη των φασματικών γραμμών υπολογίστηκαν τρεις διαφορές ενεργειών μεταξύ των διεγερμένων καταστάσεων και της θεμελιώδους κατάστασης και βρέθηκαν ίσες με 12,75eV, 12,09eV και 10,2eV.
α. Να υπολογίσετε τις ενέργειες που αντιστοιχούν στις διεγερμένες καταστάσεις των ατόμων υδρογόνου.
β. Να υπολογίσετε τους κβαντικούς αριθμούς στους οποίους αντιστοιχούν οι διεγερμένες καταστάσεις.
γ. Να σχεδιάσετε το διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών, στο οποίο να φαίνονται οι μεταβάσεις των ηλεκτρονίων που πραγματοποιούνται.
δ. Σε ένα από τα άτομα του υδρογόνου, που βρίσκεται πλέον στη θεμελιώδη κατάσταση, προσπίπτει μονοχρωματική ακτινοβολία, με συνέπεια το ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου να έχει κινητική ενέργεια $K=6,29eV$, σε περιοχή όπου η επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα είναι πρακτικά μηδέν. Να υπολογίσετε τη συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

12. Προκειμένου να διαπιστωθεί η ύπαρξη κοιλότητας στο εσωτερικό ενός μεταλλικού αντικειμένου, χρησιμοποιούνται ακτίνες Χ. Στη διάταξη παραγωγής των ακτίνων Χ, η τάση που εφαρμόζεται μεταξύ της ανόδου και της καθόδου είναι 16.575V. Τα ηλεκτρόνια ξεκινούν από την κάθοδο με μηδενική ταχύτητα, επιταχύνονται και προσπίπτουν στη άνοδο. Θεωρούμε ότι η θερμοκρασία της καθόδου είναι σταθερή και ότι η κινητική ενέργεια κάθε ηλεκτρονίου μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε ενέργεια ενός φωτονίου σε μία μόνο κρούση. Να υπολογίσετε:
α. την κινητική ενέργεια που έχει κάθε ηλεκτρόνιο όταν φθάνει στην άνοδο.
β. το ελάχιστο μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το υλικό της ανόδου.
Στην παραπάνω διάταξη παραγωγής ακτίνων Χ, μεταβάλλοντας την τάση της ανόδου και καθόδου, η αρχική ισχύς P_1 της δέσμης των ηλεκτρονίων τετραπλασιάζεται και παίρνει την τιμή $P_2=4P_1$, ενώ η θερμοκρασία της καθόδου διατηρείται σταθερή και η ένταση του ρεύματος των ηλεκτρονίων παραμένει η ίδια. Να υπολογίσετε:
γ. το λόγο των ταχυτήτων υ_1/υ_2, όπου υ_1 και υ_2 οι ταχύτητες με τις οποίες τα ηλεκτρόνια προσπίπτουν στην άνοδο πριν και μετά τον τετραπλασιασμό της ισχύος, αντίστοιχα.
δ. το ελάχιστο μήκος κύματος της παραγόμενης ακτινοβολίας, μετά τον τετραπλασιασμό της ισχύος και να δικαιολογίσετε ποια από τις δύο ακτινοβολίες είναι περισσότερο διεισδυτική.

Αιτιοκρατία και κβαντομηχανική

Η επιτυχία των επιστημονικών θεωριών, ιδιαίτερα της θεωρίας του Νεύτωνα για τη βαρύτητα, οδήγησε στις αρχές του 19ου αιώνα το Γάλλο φυσικό Pierre Simon Laplace (Λαπλάς) να υποστηρίξει ότι το Σύμπαν είναι απολύτως ντετερμινιστικό (αιτιοκρατικό). Υπέθεσε ότι πρέπει να υπάρχει ένα σύνολο φυσικών νόμων, που θα μας επέτρεπε να προβλέψουμε οτιδήποτε συμβαίνει στο Σύμπαν, αν γνωρίζαμε απόλυτα την κατάστασή του σε κάποια χρονική στιγμή.



Ο Laplace όμως δεν περιορίστηκε σ' αυτό. Υποστήριξε ότι υπάρχουν παρόμοιοι νόμοι που προσδιορίζουν τα πάντα, ακόμη και την ανθρώπινη συμπεριφορά.

Το δόγμα του επιστημονικού ντετερμινισμού καταπολεμήθηκε από πολλούς που αισθάνονταν ότι περιόριζε την ελευθερία του Θεού να παρεμβαίνει στον κόσμο, παρέμεινε όμως το βασικό αξίωμα της επιστήμης έως και τα πρώτα χρόνια του αιώνα μας. Μία από τις πρώτες ενδείξεις ότι η πεποίθηση αυτή πρέπει να εγκαταλειφθεί παρουσιάστηκε κατά τη μελέτη της ακτινοβολίας των θερμών σωμάτων, όπως τα άστρα. Σύμφωνα με ό,τι πίστευαν εκείνη την εποχή, ένα θερμό αντικείμενο έπρεπε να ακτινοβολεί στο περιβάλλον του την ίδια ποσότητα ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας σε όλες τις περιοχές συχνοτήτων. Επειδή όμως οι περιοχές συχνοτήτων είναι άπειρες, έπρεπε να είναι άπειρη και η συνολική ποσότητα ακτινοβολούμενης ενέργειας.

Για να αποφύγει αυτό το προφανώς μη αποδεκτό συμπέρασμα, ο Γερμανός φυσικός Max Planck υπέθεσε το 1900 ότι η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια εκπέμπεται κατά ασυνεχή ποσά, που ονομάστηκαν κβάντα. Επιπλέον κάθε κβάντο μεταφέρει ποσότητα ενέργειας που είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα των κυμάτων που εκπέμπονται. Άρα η εκπομπή ακτινοβολίας στις μεγάλες συχνότητες θα περιορίζεται, αφού εκεί η εκπομπή ενός κβάντου απαιτεί μεγαλύτερη ενέργεια από όση είναι διαθέσιμη. Έτσι το συνολικό ποσό ενέργειας που εκπέμπεται θα ήταν περιορισμένο και όχι άπειρο.

Οι επιπτώσεις της θεωρίας των κβάντων για το δόγμα του ντετερμινισμού δεν κατανοήθηκαν παρά μόνο το 1926, όταν ένας άλλος Γερμανός φυσικός, ο Werner Heisenberg (Χάισενμπεργκ), διατύπωσε την περίφημη αρχή του, την αρχή της απροσδιοριστίας.

Για να μπορέσουμε να προβλέψουμε τη μελλοντική θέση και ταχύτητα ενός σωματιδίου, πρέπει να μπορούμε να μετρήσουμε επακριβώς την τωρινή του θέση και ταχύτητα. Ο προφανής τρόπος, για να πετύχουμε κάτι τέτοιο, είναι να φωτίσουμε το σωματίδιο. Κάποια από τα κύματα του φωτός θα ανακλαστούν πάνω του και θα υποδείξουν το σημείο όπου βρίσκεται. Δε θα μπορούμε όμως να προσδιορίσουμε τη θέση του με μεγαλύτερη ακρίβεια από την απόσταση μεταξύ των κορυφών των κυμάτων του φωτός που χρησιμοποιούμε. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι, για να μετρήσουμε με πολύ μεγάλη ακρίβεια τη θέση ενός σωματιδίου, χρειαζόμαστε φως με πολύ μικρό μήκος κύματος. Αλλά από την υπόθεση των κβάντων του Planck προκύπτει ότι δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε οσοδήποτε μικρή ποσότητα φωτός. Πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τουλάχιστον ένα κβάντο. Αυτό το κβάντο θα προκαλέσει μια απρόβλεπτη διαταραχή στη θέση και στην ταχύτητα του σωματιδίου. Επιπλέον όσο μεγαλύτερη είναι η απαιτούμενη ακρίβεια μέτρησης της θέσης του σωματιδίου τόσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος του φωτός που χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε, και τόσο μεγαλύτερη η ενέργεια του κβάντου. Έτσι η ταχύτητα του σωματιδίου θα υποστεί ακόμη μεγαλύτερη διαταραχή.

Με άλλα λόγια, όσο πιο μεγάλη είναι η ακρίβεια με την οποία προσπαθούμε να μετρήσουμε τη θέση του σωματιδίου τόσο πιο μικρή είναι η ακρίβεια με την οποία μπορούμε να μετρήσουμε την ταχύτητά του και αντίστροφα. Ο Heisenberg έδειξε ότι, αν πολλαπλασιάσουμε την απροσδιοριστία στη θέση του σωματιδίου επί την απροσδιοριστία στην ταχύτητά του, επί τη μάζα του, θα έχουμε έναν αριθμό που δεν μπορεί ποτέ να γίνει πιο μικρός από ορισμένη ποσότητα, τη λεγόμενη σταθερά του Planck.

Η αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg είναι θεμελιώδης χαρακτηριστική ιδιότητα του κόσμου. Η αρχή της απροσδιοριστίας είχε βαθιά επίπτωση στην εικόνα του ανθρώπου για τον κόσμο. Αν και πέρασαν περισσότερα από πενήντα χρόνια, αυτή η επίπτωση δεν έχει κατανοηθεί εντελώς από πολλούς φιλοσόφους και εξακολουθεί να αποτελεί αντικείμενο διαμάχης.

Η αρχή της απροσδιοριστίας σήμανε το τέλος του ονείρου του Laplace για μία θεωρία της Φυσικής και ένα μοντέλο του Σύμπαντος που θα ήταν απόλυτα ντετερμινιστικά. Η νέα θεωρία, που βασίστηκε στην αρχή της απροσδιοριστίας, ονομάστηκε κβαντική μηχανική. Σύμφωνα με τη νέα θεωρία, ένα σωματίδιο δεν έχει μία θέση και μία ταχύτητα διαχωρισμένες μεταξύ τους, καλά ορισμένες και παρατηρήσιμες. Αντί γι' αυτές περιγράφεται με μία συνάρτηση της θέσης και της ταχύτητάς του, που λέγεται κυματοσυνάρτηση. Η κυματοσυνάρτηση μας μιλά μόνο για τις πιθανότητες να έχει το σωματίδιο διάφορες τιμές θέσης και ταχύτητας.

Η κβαντική μηχανική δεν προβλέπει για ένα πείραμα ένα μοναδικά καθορισμένο αποτέλεσμα, αλλά ένα πλήθος διαφορετικών πιθανών αποτελεσμάτων και μας πληροφορεί για το πόσο πιθανό είναι το καθένα τους. Η κβαντική μηχανική εισάγει λοιπόν στην επιστήμη ένα αναπόφευκτο στοιχείο αδυναμίας πρόβλεψης και τυχαίου.

Απόσπασμα από το βιβλίο
Το χρονικό του χρόνου του Stephen Hawking (Στέφαν Χόκινγκ).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2
ΑΤΟΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ
ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Ποιο είναι το πρότυπο του Thomson για το άτομο;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 42.

2. Ποιο είναι το πρότυπο του Rutherford για το άτομο;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 42.

3. Όταν μία δέσμη σωματίων α κατευθύνεται σε λεπτό μεταλλικό φύλλο στόχου, τότε παρατηρούμε ότι:

i. τα περισσότερα σωμάτια α περνάνε ανεπηρέαστα μέσα από το στόχο, ii. αρκετά σωμάτια α αποκλίνουν σε διάφορες γωνίες, ενώ λίγα αποκλίνουν κατά 180°. Ποια από τις παραπάνω παρατηρήσεις δείχνει ότι:

α. Ο χώρος μέσα στο άτομο είναι σχεδόν κενός.

β. Το θετικό φορτίο του ατόμου είναι συγκεντρωμένο στο κέντρο του ατόμου.

γ. Το κέντρο του ατόμου είναι θετικά φορτισμένο.

Απάντηση: (α - i) και (β, γ - ii).

4. Να εξηγήσετε γιατί το πρότυπο του Rutherford αδυνατεί να ερμηνεύσει τα γραμμικά φάσματα των αερίων.

Απάντηση: Βλ. σελίδα 45.

5. Να διατυπώσετε το πρότυπο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου.

Απάντηση: Βλ. σελίδες 45-46.

6. Να υπολογίσετε την κινητική, τη δυναμική και την ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου του ατόμου του υδρογόνου σε συνάρτηση με την ακτίνα της τροχιάς του.

Απάντηση: Βλ. σελίδες 46-47.

7. Να σχεδιάσετε το διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών για το άτομο του υδρογόνου.

Απάντηση: Βλ. σελίδα 50.

8. Τι ονομάζεται:
α. διέγερση,
β. ιονισμός,
γ. ενέργεια διέγερσης και
δ. ενέργεια ιονισμού;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 50.

9. Να περιγράψετε το μηχανισμό διέγερσης του ατόμου:
α. λόγω κρούσης και
β. λόγω απορρόφησης ακτινοβολίας.

Απάντηση: Βλ. σελίδα 51.

10. Ποια γραμμικά φάσματα μπορεί να ερμηνεύσει το πρότυπο του Bohr και ποια δεν μπορεί;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 52.

11. Πώς παράγονται οι ακτίνες Χ;

Απάντηση: Βλ. σελίδες 54-55.

12. Πώς ερμηνεύεται το γραμμικό φάσμα των ακτίνων Χ και πώς το συνεχές φάσμα;

Απάντηση: Βλ. σελίδες 55-56.

13. Να υπολογιστεί το ελάχιστο μήκος κύματος των ακτίνων Χ.

Απάντηση: Βλ. σελίδα 56.

14. Από ποιους παράγοντες εξαρτάται η απορρόφηση των ακτίνων Χ και με ποιο τρόπο;

Απάντηση: Βλ. σελίδες 56-57.

15. Ποια είναι η φύση των ακτίνων Χ;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 55.

16. Πού χρησιμοποιούνται οι ακτίνες Χ;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 57.

17. Ποιες είναι οι βιολογικές βλάβες που προκαλούν οι ακτίνες Χ;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 58.

18. Πώς επηρεάζονται οι ακτίνες Χ:
α. από τη θερμοκρασία της καθόδου,
β. από την τάση που εφαρμόζεται μεταξύ της ανόδου και της καθόδου,
γ. από το υλικό της ανόδου;

Απάντηση: (α) Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία της καθόδου τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται από την κάθοδο στη μονάδα του χρόνου.

(β) Από την εξίσωση $\lambda_{min}=ch/eV$ προκύπτει ότι, όσο μεγαλύτερη είναι η τάση που εφαρμόζεται μεταξύ της ανόδου και της καθόδου, τόσο μικρότερο είναι το ελάχιστο μήκος κύματος του συνεχούς φάσματος των ακτίνων Χ.

(γ) Το γραμμικό φάσμα των ακτίνων Χ είναι χαρακτηριστικό του υλικού της ανόδου. Επομένως αν αλλάξουμε το υλικό της ανόδου τότε θα αλλάξει και το γραμμικό φάσμα.

19. Το ηλεκτρόνιο στο άτομο του υδρογόνου, το οποίο βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση:
α. έχει απομακρυνθεί από το άτομο,
β. [illegible]ει,
γ. είναι σε τροχιά με τη χαμηλότερη ενέργεια,
δ. είναι σε τροχιά με την υψηλότερη ενέργεια.

Απάντηση: Η γ είναι η σωστή.

20. Ένα άτομο εκπέμπει ένα φωτόνιο, όταν ένα από τα ηλεκτρόνιά του:
α. απομακρύνεται από το άτομο,
β. μεταπηδά σε τροχιά μικρότερης ενέργειας,
γ. μεταπηδά σε τροχιά μεγαλύτερης ενέργειας.

Απάντηση: Η β είναι η σωστή.

21. Το γραμμικό φάσμα εκπομπής αερίου περιέχει μήκη κύματος που είναι:
α. ίδια για όλα τα στοιχεία,
β. χαρακτηριστικά του στοιχείου που το εκπέμπει,
γ. διαφορετικά από τα μήκη κύματος του φάσματος απορρόφησης του ίδιου στοιχείου.

Απάντηση: Η β είναι η σωστή.

22. Ποιο από τα παρακάτω πειραματικά δεδομένα δείχνει την ύπαρξη διακριτών

ενεργειακών σταθμών στα άτομα;

α. Το φάσμα εκπομπής ενός στοιχείου περιέχει φωτεινότερες γραμμές σε μεγαλύτερη θερμοκρασία.

β. Το φάσμα απορρόφησης ενός στοιχείου έχει σκοτεινές γραμμές στις θέσεις που αντιστοιχούν στις φωτεινές γραμμές του φάσματος εκπομπής.

γ. Το φάσμα των ακτίνων Χ παρουσιάζει ένα ελάχιστο μήκος κύματος.

Απάντηση: Η β είναι η σωστή.

23. Ποια από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστή;

α. Η ενέργεια ιονισμού είναι μικρότερη από την ενέργεια διέγερσης.

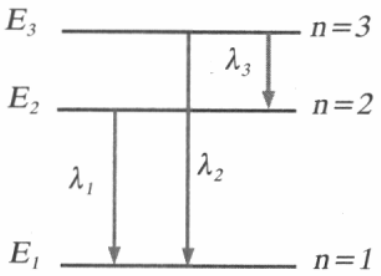
β. Η ενέργεια ενός φωτονίου είναι hλ, όπου λ είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.

γ. Ένα ηλεκτρόνιο που βρίσκεται σε διεγερμένη ενεργειακή στάθμη ακτινοβολεί συνεχώς ενέργεια.

δ. Η θεμελιώδης κατάσταση του ατόμου του υδρογόνου είναι η κατάσταση στην οποία το ηλεκτρόνιο βρίσκεται στη χαμηλότερη επιτρεπτή ενεργειακή στάθμη.

Απάντηση: Η δ είναι η σωστή.

24. Το σχήμα δείχνει το διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών του ατόμου του υδρογόνου. Τα μήκη κύματος λ_1, λ_2, λ_3 είναι τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται κατά τις μεταβάσεις του ηλεκτρονίου μεταξύ των ενεργειακών σταθμών, όπως δείχνουν τα βέλη. Ποια από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστή;



α. $\lambda_2=\lambda_1+\lambda_3$,

β. $\lambda_2<\lambda_3$

γ. $f_2=f_1+f_3$

Απάντηση: Η γ είναι η σωστή.

25. Το φάσμα απορρόφησης ενός αερίου εμφανίζει μια συνεχή χρωματιστή ταινία που διακόπτεται από σκοτεινές γραμμές:

α. Οι θέσεις των σκοτεινών γραμμών είναι χαρακτηριστικές του στοιχείου.

β. Μπορεί δύο διαφορετικά στοιχεία να έχουν το ίδιο φάσμα απορρόφησης.

γ. Οι σκοτεινές γραμμές δημιουργούνται, γιατί το λευκό φως απορροφά την ακτινοβολία που εκπέμπει το αέριο.

Απάντηση: Η α είναι η σωστή.

26. Το γραμμικό φάσμα των ακτίνων Χ αποτελείται από δύο γραμμές που αντιστοιχούν σε μήκη κύματος λ_1 και λ_2 αντίστοιχα. Οι γραμμές αυτές θα μετατοπιστούν, αν αλλάξουμε:

α. το υλικό της ανόδου,
β. την τάση μεταξύ της ανόδου και της καθόδου,
γ. τη θερμοκρασία της καθόδου.

Απάντηση: Η α είναι η σωστή.

27. Το ελάχιστο μήκος λ_{min} του συνεχούς φάσματος των ακτίνων Χ θα μεταβληθεί, αν μεταβάλλουμε:
α. το υλικό της ανόδου,
β. τη θερμοκρασία της καθόδου,
γ. τη διαφορά δυναμικού μεταξύ της ανόδου και της καθόδου.
Θεωρούμε ότι τα ηλεκτρόνια ξεκινούν από την κάθοδο με μηδενική ταχύτητα.

Απάντηση: Η γ είναι η σωστή.

ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Οι παρακάτω φυσικές σταθερές θεωρούνται γνωστές:

Σταθερά του νόμου Coulomb	$k = 9 \cdot 10^9\ Nm^2/C^2$
Φορτίο ηλεκτρονίου	$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ C$
Μάζα ηλεκτρονίου	$m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}\ kg$
Σταθερά του Plank	$h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s$
Ταχύτητα του φωτός στο κενό	$c = 3 \cdot 10^8\ m/s$

1. Το άτομο του υδρογόνου βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση. Η ακτίνα της τροχιάς του ηλεκτρονίου είναι $r=5{,}3x10^{-11}m$. Να υπολογιστούν:
α. η ταχύτητα του ηλεκτρονίου,
β. η περίοδος της κίνησης του ηλεκτρονίου,
γ. η κινητική, η δυναμική και η ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου.

Απάντηση:

α. Η ταχύτητα του ηλεκτρονίου δίνεται από την εξίσωση $\upsilon = e\sqrt{\frac{k}{m \cdot r}}$. Αντικαθιστώντας $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ C$, $k = 9 \cdot 10^9\ Nm^2/C^2$, $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}\ kg$ και $r = 5{,}3 \cdot 10^{-11}\ m$ βρίσκουμε: $\upsilon=2{,}19x10^6 m/s$.

β. Η περίοδος της κίνησης του ηλεκτρονίου είναι:

$$T = \frac{2\pi r}{\upsilon} = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 5{,}3 \cdot 10^{-11}}{2{,}19 \cdot 10^{6}} s = 1{,}52 \cdot 10^{-16} s$$

γ. Η κινητική, η δυναμική και η ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου δίνονται από τις εξισώσεις:

$$K = \tfrac{1}{2} m\upsilon^2 = k\frac{e^2}{2r},\ U = -k\frac{e^2}{r},\ E = K + U = -k\frac{e^2}{2r}$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των k, e, r και λαμβάνοντας υπόψη ότι $1eV=1{,}6x10^{-19}J$ βρίσκουμε: K=13,6eV, U=–27,2eV και E=–13,6eV.

2. Η ενέργεια του ατόμου του υδρογόνου, όταν αυτό βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση, είναι –13,6eV:
α. Ποια θα είναι η ενέργεια του ατόμου στην πρώτη διεγερμένη κατάσταση (n=2) και ποια στη δεύτερη διεγερμένη κατάσταση (n=3);
β. Το άτομο διεγείρεται και αποκτά ενέργεια –0,85eV. Σε ποιο κύριο κβαντικό αριθμό αντιστοιχεί η διεγερμένη αυτή κατάσταση;

Απάντηση:

α. Η ενέργεια του ατόμου σε κατάσταση που αντιστοιχεί σε κβαντικό αριθμό n είναι:

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}$$

Αντικαθιστώντας E_1=–13,6eV και n=2 βρίσκουμε $E_2 = \frac{-13{,}6}{2^2} = -3{,}4\ eV$.

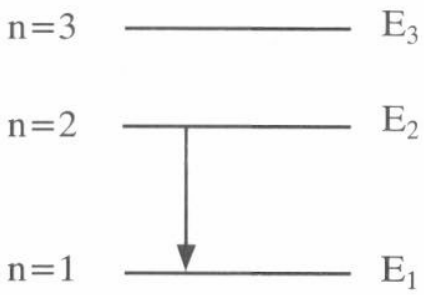
Για n=3 παίρνουμε $E_2 = \frac{-13{,}6}{3^2} = -1{,}51\ eV$.

(β) $E_n = \frac{E_1}{n^2}$ ή $n = \sqrt{\frac{E_1}{E_n}} = \sqrt{\frac{-13{,}6}{-0{,}85}} = 4$

3. Η ενέργεια του ατόμου του υδρογόνου, όταν βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση, είναι –13,6eV. Ηλεκτρόνια συγκρούονται με άτομα του υδρογόνου τα οποία βρίσκονται στη θεμελιώδη κατάσταση. Τα άτομα διεγείρονται και εκπέμπουν γραμμικό φάσμα που αποτελείται μόνο από μία γραμμή ορισμένης συχνότητας. Ποια είναι η ελάχιστη και ποια η μέγιστη ενέργεια των ηλεκτρονίων που διεγείρουν τα άτομα του υδρογόνου; (Η ορμή του ατόμου δε μεταβάλλεται κατά την κρούση.)

Απάντηση:

Αφού το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας αποτελείται από μία γραμμή, το ηλεκτρόνιο του ατόμου θα αποδιεγείρεται από την κατάσταση n=2 στην κατάσταση n=1. Επομένως τα ηλεκτρόνια θα έχουν ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση από την ενέργεια που αντιστοιχεί στη διέγερση από n=1 έως n=2 και μικρότερη από την ενέργεια που αντιστοιχεί στη διέγερση από n=1 έως n=3.



Δηλαδή:

$$E_2 - E_1 \leq K < E_3 - E_1$$

$$\frac{E_1}{2^2} - E_1 \leq K < \frac{E_1}{3^2} - E_1$$

Αντικαθιστώντας $E_1 = -13{,}6\text{eV}$ βρίσκουμε: $10{,}2\text{eV} \leq K < 12{,}09\text{eV}$.

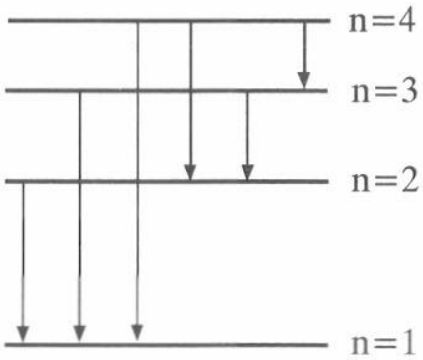
4. Διεγερμένα άτομα υδρογόνου βρίσκονται σε κατάσταση που αντιστοιχεί σε κβαντικό αριθμό n=4:

α. Να υπολογιστεί το πλήθος των γραμμών του φάσματος εκπομπής του αερίου.

β. Να σχεδιαστεί το διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών, στο οποίο να φαίνονται οι μεταβάσεις που πραγματοποιούνται.

Απάντηση:

Το πλήθος των γραμμών του φάσματος είναι έξι (σχήμα).



5. Το άτομο του υδρογόνου βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση στην οποία η ολική ενέργεια είναι –13,6eV:

α. Ποια ελάχιστη ενέργεια απαιτείται, για να ιονιστεί το άτομο;

β. Ποια ενέργεια απαιτείται, για να διεγερθεί το άτομο στην πρώτη διεγερμένη κατάσταση (n=2);

γ. Το άτομο του υδρογόνου απορροφά, λόγω κρούσης, ενέργεια 15eV και ιονίζεται. Ποια κινητική ενέργεια αποκτά τελικά το ηλεκτρόνιο, αν η κινητική ενέργεια του ατόμου δε μεταβάλλεται κατά την κρούση;

Απάντηση:

(α) Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται, για να ιονιστεί το άτομο, είναι:

$$E_{ιον.} = E_{\infty} - E_1 = 0 - (-13,6) = 13,6eV$$

(β) Η ενέργεια που απαιτείται, για να διεγερθεί το άτομο από την κατάσταση n=1 στην κατάσταση n=2, είναι:

$$E_{διεγ.} = E_2 - E_1 = \frac{E_1}{n^2} - E_1 = -3,4 + 13,6 = 10,2eV$$

(γ) Η κινητική ενέργεια που αποκτά τελικά το ηλεκτρόνιο είναι ίση με τη διαφορά της ενέργειας που απορροφά το άτομο (15eV) και της ενέργειας που απαιτείται, για να ιονιστεί το άτομο (10,2eV):

$$K = 15eV - 13,6eV = 1,4eV$$

6. Ηλεκτρόνια επιταχύνονται μέσω τάσης 12,3V και περνάνε μέσα από αέριο που αποτελείται από άτομα υδρογόνου τα οποία βρίσκονται στη θεμελιώδη κατάσταση. Να υπολογιστούν τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπει το αέριο. Η ενέργεια του ατόμου του υδρογόνου στη θεμελιώδη κατάσταση είναι –13,6eV.

Απάντηση:

Τα ηλεκτρόνια μπορεί να δώσουν οποιοδήποτε μέρος της ενέργειάς τους σε μια κρούση. Το άτομο διεγείρεται από την κατάσταση n=1 έως την κατάσταση n και απορροφά ενέργεια:

$$E = E_n - E_1 = \frac{E_1}{n^2} - E_1$$

Το άτομο απορροφά ενέργεια ίση ή μικρότερη από την ενέργεια των ηλεκτρονίων (12,3eV). Άρα:

$$E \leq 12,3eV \text{ ή } \frac{E_1}{n^2} - E_1 \leq 12,3eV \text{ ή}$$

$$-13,6(\frac{1}{n^2} - 1)\,eV \leq 12,3eV \text{ ή } n \leq 3,16 \text{ ή } n=1, 2, 3$$

Επομένως το άτομο μπορεί να διεγερθεί από τη θεμελιώδη κατάσταση έως την κατάσταση n=2 ή n=3. Κατά την αποδιέγερσή του μπορεί να πραγματοποιήσει τις μεταβάσεις:

α. n=3 σε n=2
β. n=3 σε n=1
γ. n=2 σε n=1

Για καθεμιά από τις παραπάνω μεταβάσεις εκπέμπεται ένα φωτόνιο, το μήκος κύματος του οποίου υπολογίζεται ως εξής:

$$E=hf \text{ ή } E=h\frac{c}{\lambda} \text{ ή } \lambda=\frac{hc}{E}$$

$$\text{όπου } E = E_3 - E_2 \text{ ή } E = E_3 - E_1 \text{ ή } E = E_2 - E_1$$

α. μετάβαση από n=3 σε n=2:

$$\lambda_{32}=\frac{hc}{E_3-E_2}=\frac{hc}{\frac{E_1}{3^2}-\frac{E_1}{2^2}}$$

β. μετάβαση από n=3 σε n=1:

$$\lambda_{31}=\frac{hc}{E_3-E_1}=\frac{hc}{\frac{E_1}{3^2}-\frac{E_1}{1^2}}$$

γ. μετάβαση από n=2 σε n=1:

$$\lambda_{21}=\frac{hc}{E_2-E_1}=\frac{hc}{\frac{E_1}{2^2}-\frac{E_1}{1^2}}$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των h, c και E_1 βρίσκουμε:

$$\lambda_{32}=6{,}58\cdot10^{-7}\,m=658nm$$

$$\lambda_{31}=1{,}03\cdot10^{-7}\,m=103nm$$

$$\lambda_{21}=1{,}22\cdot10^{-7}\,m=122nm$$

7. Σε σωλήνα παραγωγής ακτίνων X τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται από τάση 10kV. Να υπολογιστεί η μέγιστη συχνότητα και το ελάχιστο μήκος κύματος των ακτίνων X που παράγονται.

Απάντηση:

Το ελάχιστο μήκος κύματος δίνεται από την εξίσωση: $\lambda = \frac{hc}{eV}$.

Αντικαθιστώντας βρίσκουμε: $\lambda = 1{,}243 \cdot 10^{-10}\,m$.

Η αντίστοιχη συχνότητα είναι $c=\lambda f$ ή $f = \frac{c}{\lambda} = 2{,}41 \cdot 10^{18}\,Hz$.

8. Σε σωλήνα παραγωγής ακτίνων Χ εφαρμόζεται τάση (α) $V_1=10kV$, (β) $V_2=40kV$. Τα αντίστοιχα ελάχιστα μήκη κύματος των ακτίνων Χ είναι λ_1 και λ_2. Να υπολογιστεί ο λόγος λ_1/λ_2.

Απάντηση:

Το ελάχιστο μήκος κύματος του συνεχούς φάσματος των ακτίνω Χ δίνεται από την εξίσωση:

$$\lambda = \frac{hc}{eV}$$

Για τις περιπτώσεις (α) και (β) παίρνουμε:

$$\lambda_1 = \frac{hc}{eV_1} \text{ και } \lambda_2 = \frac{hc}{eV_2}$$

Διαιρούμε τις τελευταίες εξισώσεις κατά μέλη:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{V_2}{V_1} \text{ ή } \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 4$$

9. Σε μια ακτινογραφία απαιτούνται ακτίνες Χ μήκους κύματος $\lambda=10^{-10}m$. Η ένταση του ρεύματος της δέσμης των ηλεκτρονίων είναι 40mA και ο χρόνος λήψης της ακτινογραφίας είναι 0,1s. Θεωρούμε ότι όλη η κινητική ενέργεια κάθε ηλεκτρονίου μετατρέπεται σε ενέργεια ενός φωτονίου:

α. Ποια τάση εφαρμόζεται στο σωλήνα παραγωγής ακτίνων Χ;
β. Πόση ισχύ και πόση ενέργεια μεταφέρει η ηλεκτρονική δέση;
γ. Ποια είναι η ταχύτητα των ηλεκτρονίων τη στιγμή που προσπίπτουν στην άνοδο;
δ. Πόσα ηλεκτρόνια σε κάθε δευτερόλεπτο προσπίπτουν στην άνοδο;

Απάντηση:

α. Η ενέργεια (eV), που αποκτά το ηλεκτρόνιο εξαιτίας της επιτάχυνσής του μέσω της τάσης V, μεταβιβάζεται σε ένα φωτόνιο (hf). Άρα:

$$eV = hf \text{ ή } eV = \frac{hc}{\lambda} \text{ ή } V = \frac{hc}{e\lambda} = 12431V$$

β. Η ισχύς και η ενέργεια που μεταφέρει η δέσμη των ηλεκτρονίων είναι αντίστοιχα:

$$P = VI = 497W$$

$$E = Pt = 49{,}7J$$

γ. Η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων είναι ίση με την ενέργεια eV.

$$eV = \frac{1}{2}m_e\upsilon^2 \text{ ή } \upsilon = \sqrt{\frac{2eV}{m_e}} = 6{,}61 \cdot 10^7 m/s$$

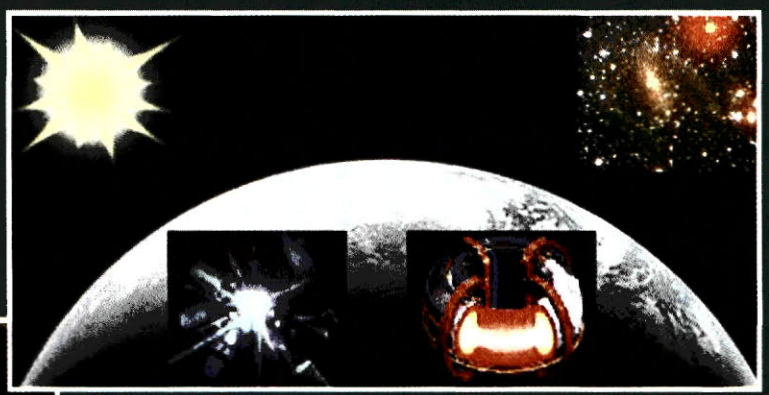
δ. Ο αριθμός των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν στην άνοδο σε κάθε δευτερόλεπτο είναι:

$$N = \frac{q}{t} = \frac{I \cdot t}{e} = 25 \cdot 10^{16} \text{ ηλεκτρόνια/s}$$

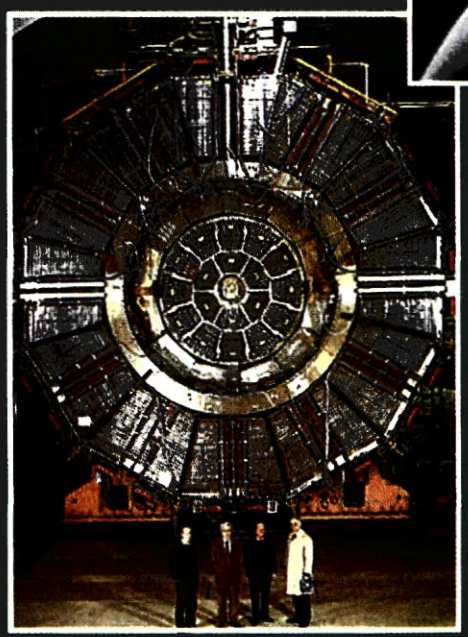
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

- Ιδιότητες των πυρήνων
- Τα στοιχειώδη σωματίδια
- Η ραδιενέργεια
- Πυρηνικές αντιδράσεις
- Εφαρμογές και κίνδυνοι της ραδιενέργειας



Ο ενεργειακός γίγαντας- πυρήνας εκδηλώνει την παρουσία του τόσο στο μικρόκοσμο όσο και σε φαινόμενα συμπαντικής κλίμακας.



Οι διατάξεις των ανιχνευτών σωματιδίων είναι τα ηλεκτρονικά μάτια των φυσικών για να παρατηρούν τα υποατομικά σωματίδια.

Η τρομακτική φωτογραφία του «μανιταριού» μιας πυρηνικής έκρηξης

Το πιθανό αποτέλεσμα μιας πυρηνικής έκρηξης ενός μεγατόνου θα ήταν η καταστροφή μιας πόλης σαν την Αθήνα. Η έκρηξη θα προκαλούσε τεράστια πυρκαγιά, που θα κατάπινε το μεγαλύτερο μέρος της πόλης. Ο καπνός και η σκόνη, που θα διασκορπίζονταν στην ατμόσφαιρα από παρόμοιες εκρήξεις, θα προκαλούσαν έναν πυρηνικό χειμώνα με πολύ χαμηλές θερμοκρασίες.

3-1 *Albert Einstein (1879-1955) και Robert Oppenheimer (1904-1967). Ο πρώτος, με μια επιστολή του το 1939 στον πρόεδρο Ρούζβελτ, υπέδειξε τη δυνατότητα κατασκευής ατομικής βόμβας. Μετά τον πόλεμο έπαιξε ενεργό ρόλο στην προσπάθεια αφοπλισμού. Ο δεύτερος ήταν ο πρωτεργάτης της κατασκευής της πρώτης βόμβας ουρανίου που ρίχτηκε στη Χιροσίμα.*

3-2 *Ένα κορίτσι - θύμα της ρίψης της πυρηνικής βόμβας πλουτωνίου στο Ναγκασάκι.*

3.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΠΥΡΗΝΩΝ

Λίγες ανακαλύψεις έμελλαν να έχουν τόσο σημαντική επίδραση στην ανθρώπινη ιστορία όσο η ανακάλυψη της πυρηνικής ενέργειας.

Από το 1896 ο Henri Becquerel (Ανρί Μπεκερέλ) είχε διαπιστώσει ότι ένα ορυκτό που περιείχε ουράνιο εξέπεμπε μια αόρατη ακτινοβολία, η οποία διαπερνούσε το μαύρο χαρτί που κάλυπτε το ορυκτό και προσέβαλλε τη φωτογραφική πλάκα. Η μεγάλη ενέργεια αυτής της ακτινοβολίας, που εκπεμπόταν αυθόρμητα, δεν αντιστοιχούσε σε καμιά από τις γνωστές πηγές εκπομπής ακτινοβολιών και, για να εξηγηθεί, άρχισε η μελέτη του εσωτερικού του ατόμου.

Στις αρχές του 20ού αιώνα, συγκεκριμένα το 1911, τα πειράματα του Rutherford (Ράδερφορντ) και των μαθητών του Geiger (Γκάιγκερ) και Marsden (Μάρσντεν) έδειξαν ότι ο πυρήνας ενός ατόμου μπορούσε να θεωρηθεί ως μία σχεδόν σημειακή μάζα με θετικό φορτίο και ότι η μάζα όλου του ατόμου είναι κυρίως συγκεντρωμένη στον πυρήνα.

Το γεγονός όμως που τράβηξε την προσοχή όχι μόνο των επιστημόνων αλλά και ολόκληρης της ανθρωπότητας πάνω στον πυρήνα ήταν η ανακάλυψη ότι στην «καρδιά» του ατόμου βρισκόταν ένας **ενεργειακός γίγαντας**.

3-3 *Ο Ernest Rutherford (1871-1937) ήταν ένας από τους ανθρώπους που έθεσαν τα θεμέλια για την εξερεύνηση του πυρήνα.*

3-4 Οι σημερινές ενδείξεις μάς λένε ότι το Σύμπαν γεννήθηκε σε μια γιγαντιαία έκρηξη, το Big-Bang, πριν από περίπου 15 δισεκατομμύρια χρόνια, όταν το μέγεθος όλου του Σύμπαντος ήταν μικρότερο από αυτό ενός ατόμου.

Όταν ο άνθρωπος βρήκε τρόπους να αποδεσμεύσει την πυρηνική ενέργεια, αναβίωσαν πάνω στη Γη δυνάμεις κοσμικής κλίμακας. Πρόκειται για τις ίδιες δυνάμεις που κάποτε, στο αρχέγονο παρελθόν, σχημάτισαν στα διάφορα άστρα την ύλη από την οποία είμαστε και εμείς οι ίδιοι φτιαγμένοι.

Είναι οι ίδιες δυνάμεις που προκαλούν τις πυρηνικές αντιδράσεις στον Ήλιο και στα άλλα άστρα και ελευθερώνουν την τόσο απαραίτητη για τη συνέχιση της ζωής ηλιακή ενέργεια.

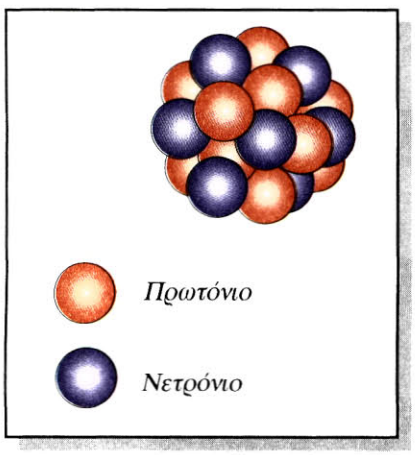
Δυστυχώς όμως η αποδέσμευση της πυρηνικής ενέργειας γέννησε και τον πιο μαζικό τρόπο αφανισμού των ανθρώπων. Το 1945 η ενέργεια που αποδεσμεύθηκε μόνο από 1kg ουρανίου ισοπέδωσε μια ολόκληρη πόλη, τη Χιροσίμα.

Σήμερα στον πλανήτη μας «συγκατοικούν» σε μια εύθραυστη ισορροπία η έμβια ύλη, που απαιτεί μικρά και ελέγξιμα ποσά ενέργειας, και ύλη έτοιμη στα οπλοστάσια να υποστεί πυρηνικές διεργασίες και να αποδεσμεύσει τεράστια και ανεξέλεγκτα ποσά ενέργειας, ικανά να εξαφανίσουν όλο τον ανθρώπινο πολιτισμό. Η αναζήτηση τρόπων τιθάσσευσης και χρησιμοποίησης της πυρηνικής ενέργειας, ώστε να τεθεί στην υπηρεσία του ανθρώπου και όχι να οδηγήσει στον αφανισμό του, πρέπει να αποτελέσει μέλημα των σύγχρονων κοινωνιών.

Το μέγεθος και η δομή των πυρήνων

Το πρότυπο του Rutherford για το άτομο είναι όμοιο με αυτό του ηλιακού μας συστήματος. Μετά από επίπονα πειράματα μετρήθηκαν οι ακτίνες του ατόμου και του πυρήνα και βρέθηκε ότι: η ακτίνα του ατόμου είναι της τάξης των 10^{-10}m και η ακτίνα του πυρήνα της τάξης μεγέθους μεταξύ των 10^{-15}m και 10^{-14}m.

Ο πυρήνας λοιπόν έχει ακτίνα μερικές δεκάδες χιλιάδες φορές μικρότερη από την ακτίνα του ατόμου. Για να γίνει αυτό αντιληπτό, μπορούμε να κάνουμε την εξής παρομοίωση: το άτομο σαν ένα μεγάλο στάδιο και τον πυρήνα σαν ένα κεράσι στο κέντρο του. Άρα το άτομο είναι σχεδόν άδειο στο εσωτερικό του.



3-5 Ένας πυρήνας μοιάζει με ένα τσαμπί, του οποίου οι ρώγες είναι τα πρωτόνια και τα νετρόνια.

Όλοι οι πυρήνες των ατόμων αποτελούνται από πιο μικροσκοπικά σωματίδια, τα **νουκλεόνια**, που τα διακρίνουμε σε **πρωτόνια** και **νετρόνια**. Ο πυρήνας του κοινού υδρογόνου είναι μόνο ένα πρωτόνιο.

Τα πρωτόνια και τα νετρόνια του πυρήνα μπορούμε να τα φανταστούμε σαν ένα τσαμπί από σταφύλια, σφαιρικού περίπου σχήματος, του οποίου οι ρώγες, δηλαδή τα πρωτόνια και τα νετρόνια, έχουν το ίδιο μέγεθος και την ίδια περίπου μάζα, αλλά διαφέρουν ως προς το ηλεκτρικό φορτίο (σχήμα 3-5). Το νετρόνιο είναι ηλεκτρικά ουδέτερο, δηλαδή έχει μηδενικό φορτίο, ενώ το πρωτόνιο φέρει το στοιχειώδες θετικό ηλεκτρικό φορτίο. Το συνολικό φορτίο του πυρήνα είναι ίσο με το άθροισμα των φορτίων των πρωτονίων του.

Στο σημείο αυτό πάντως θα πρέπει να τονιστεί ότι, ενώ στον κόσμο το δικό μας, το μακρόκοσμο, η ακινησία είναι συνηθισμένο φαινόμενο, στο μικρόκοσμο οι στοιχειώδεις δομικές μονάδες της ύλης δεν είναι δυνατό να ακινητοποιηθούν. Εκδηλώνουν μια αέναη κίνηση, δηλαδή κινούνται συνεχώς και έχουν κινητική ενέργεια.

Τη συγκρότηση κάθε πυρήνα περιγράφουμε χρησιμοποιώντας τους παρακάτω αριθμούς:

Τον **ατομικό αριθμό Z**, που είναι ο αριθμός των πρωτονίων του πυρήνα.

Τον **αριθμό νετρονίων N**.

Το **μαζικό αριθμό A**, που είναι ο αριθμός των νουκλεονίων (νετρονίων και πρωτονίων) του πυρήνα. Ισχύει δηλαδή: **A=Z+N**

Συμβολικά ένας πυρήνας θα παριστάνεται ως $^{A}_{Z}X$, όπου το X παριστάνει το χημικό σύμβολο του στοιχείου. Έτσι, για παράδειγμα, ο $^{56}_{26}Fe$ έχει μαζικό αριθμό 56 και ατομικό αριθμό 26, δηλαδή περιέχει 26 πρωτόνια και 30 νετρόνια.

Πυρήνες που ανήκουν στο ίδιο χημικό στοιχείο και έχουν τον ίδιο αριθμό πρωτονίων Z αλλά όχι και τον ίδιο αριθμό νετρονίων N ονομάζονται ισότοποι.

Γίνεται φανερό ότι οι ισότοποι πυρήνες έχουν διαφορετικό μαζικό αριθμό A. Τα ισότοπα ενός στοιχείου έχουν τον ίδιο αριθμό ηλεκτρονίων, αφού αυτός, στα ουδέτερα άτομα, είναι ίσος με τον αριθμό των πρωτονίων. Συνεπώς τα ισότοπα ενός στοιχείου έχουν τις ίδιες χημικές ιδιότητες, επειδή αυτές καθορίζονται από το πλήθος και τις ενεργειακές καταστάσεις των ατομικών ηλεκτρονίων. Γι' αυτό το λόγο στη Χημεία το όνομα κάθε στοιχείου συνοδεύεται μόνο από τον ατομικό του αριθμό Z.

Τα ισότοπα ενός στοιχείου δε βρίσκονται με την ίδια αφθονία στη φύση. Έτσι το ισότοπο $^{12}_{6}C$ του άνθρακα βρίσκεται σε ποσοστό περίπου 99% του C στη φύση, ενώ τα ισότοπα $^{13}_{6}C$ και $^{14}_{6}C$ βρίσκονται σε πολύ μικρότερα ποσοστά.

Για τη μέτρηση των μαζών των πυρήνων χρησιμοποιούμε την **μονάδα ατομικής μάζας u**, η οποία ορίζεται ως το 1/12 της μάζας του ατόμου του $^{12}_{6}C$. Αυτό σημαίνει ότι η μάζα ενός ατόμου $^{12}_{6}C$ μαζί με τα 6 ηλεκτρόνιά του είναι 12u.

Για τη μέτρηση των μαζών των πυρήνων προτιμάμε να χρησιμοποιούμε τις ατομικές μονάδες μάζας αντί για kg:

1ο γιατί οι μάζες εκφράζονται σε μικρούς αριθμούς, εύκολα συγκρίσιμες μεταξύ τους και

2ο γιατί η μάζα ενός ατόμου σε **u** είναι περίπου ίση με το μαζικό του αριθμό, A.

Σύμφωνα με τη θεωρία της σχετικότητας, η μάζα m οποιουδήποτε σώματος είναι ισοδύναμη με κάποια ποσότητα ενέργειας, όπως καθορίζεται από τη σχέση:

$$E = m\,c^2 \qquad (3.1)$$

Σύμφωνα με τη σχέση αυτή, μπορούμε να μετράμε τη μάζα ενός σωματιδίου και σε μονάδες ενέργειας. Συνήθως στην Πυρηνική χρησιμοποιούμε τη μονάδα 1MeV.

Σχέσεις των διάφορων μονάδων μάζας και ενέργειας:

$1u = 1{,}66055 \times 10^{-27}$ kg

$1eV = 1{,}602 \times 10^{-19}$ J

$1MeV = 1{,}602 \times 10^{-13}$ J

1u=931,48 MeV

Πίνακας 3.1 Μάζες ηρεμίας και φορτίο του πρωτονίου, του νετρονίου και του ηλεκτρονίου σε διάφορες μονάδες.

ΣΩΜΑΤΙΔΙΟ	ΜΑΖΑ			ΦΟΡΤΙΟ
	kg	u	MeV/c^2	C
Πρωτόνιο	$1,6726 \times 10^{-27}$	1,007276	938,28	$1,602177 \times 10^{-19}$
Νετρόνιο	$1,6750 \times 10^{-27}$	1,008665	939,57	0,000000
Ηλεκτρόνιο	$9,109 \times 10^{-31}$	$5,486 \times 10^{-4}$	0,511	$-1,602177 \times 10^{-19}$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ **3 - 1**

Να υπολογιστεί η μάζα ενός πρωτονίου σε kg, Joule και MeV.

ΛΥΣΗ Η μάζα ενός πρωτονίου είναι:

$m_p = 1,007276$ u ή

$m_p = 1,007276 \times 1,66055 \times 10^{-27}$kg $= 1,67 \times 10^{-27}$kg ή

$m_p c^2 = (1,67 \times 10^{-27}\text{kg})(3 \times 10^8 \text{m/s})^2 = 1,5 \times 10^{-10}$J ή

$m_p c^2 = (1,5 \times 10^{-10}\text{J})/(1,6 \times 10^{-13}\text{J/MeV}) = 938$MeV.

Έλλειμμα μάζας - Ενέργεια σύνδεσης

Ας θεωρήσουμε τον απλό πυρήνα δευτέριο ^2_1H που περιέχει ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο και ας αναρωτηθούμε πόση είναι η μάζα του. Μια πρώτη απάντηση ίσως να ήταν ότι είναι ίση με το άθροισμα των μαζών των νουκλεονίων του, δηλαδή $1m_p + 1m_n$. Πειραματικά όμως έχει βρεθεί ότι η μάζα του πυρήνα ^2_1H είναι μικρότερη από το άθροισμα αυτό. Η ιδιότητα αυτή των πυρήνων να έχουν μικρότερη μάζα από το άθροισμα των μαζών των νουκλεονίων τους είναι γενική για κάθε πυρήνα.

Η διαφορά της μάζας M_Π ενός πυρήνα από το άθροισμα των μαζών των ελεύθερων νουκλεονίων του ονομάζεται **έλλειμμα μάζας** και παριστάνεται ως ΔM. Για έναν πυρήνα με Z πρωτόνια και N νετρόνια ορίζουμε ως έλλειμμα μάζας ΔM τη διαφορά:

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_\Pi \qquad (3.2\alpha)$$

Η ισοδύναμη ενέργεια που αντιστοιχεί στο έλλειμμα μάζας ονομάζεται **ενέργεια σύνδεσης**, παριστάνεται ως E_B και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_B = (\Delta M)c^2 \qquad (3.2\beta)$$

Αυτή ακριβώς η ενέργεια σύνδεσης εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια που πρέπει να δώσουμε, για να απομακρύνουμε μεταξύ τους τα πρωτόνια και τα νετρόνια, που αποτελούν τον πυρήνα, ώστε να μην υπάρχει καμία αλληλεπίδραση μεταξύ τους.

Αν διαιρέσουμε την ενέργεια σύνδεσης με το πλήθος των νουκλεονίων, παίρνουμε την ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο.

Η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο μετράει τη σταθερότητα του πυρήνα. Όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο τόσο σταθερότερος είναι ο πυρήνας.

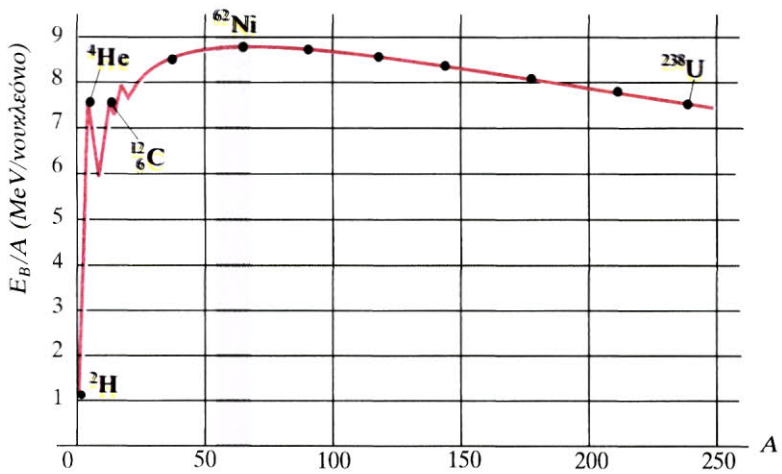
Μερικές τυπικές τιμές ενεργειών σύνδεσης για μερικούς πυρήνες αναφέρονται στον πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2

ΠΥΡΗΝΑΣ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΝΑ ΝΟΥΚΛΕΟΝΙΟ
	MeV	MeV/νουκλεόνιο
$^{12}_{6}C$	92,17	7,68
$^{16}_{8}O$	127,61	7,97
$^{28}_{14}Si$	236,93	8,46
$^{56}_{26}Fe$	492,25	8,79
$^{238}_{92}U$	1801,72	7,57

Η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο των περισσότερων πυρήνων κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 7MeV/νουκλεόνιο και 9MeV/νουκλεόνιο, όπως δείχνεται και στο σχήμα 3-6. Σ' αυτό το σχήμα παρατηρούμε ότι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο αυξάνεται γρήγορα στα ελαφριά στοιχεία, έχει ένα πλατύ μέγιστο στην περιοχή, περίπου με A=56 έως A=60, και μειώνεται αργά στα μεσαίου βάρους και βαριά στοιχεία. Όμως οι διαφορές, αν και φαίνονται μικρές, είναι σημαντικές. Παρατηρούμε επίσης ότι η αιχμή της καμπύλης στο A=4 δείχνει την ιδιαίτερη σταθερότητα της δομής του σωματίου α.

Όταν κάποιος πυρήνας πολύ μεγάλου μαζικού αριθμού διασπάται είτε αυθόρμητα είτε τεχνητά σε δύο άλλους πυρήνες μεσαίων



3-6 Η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο στον πυρήνα, ως συνάρτηση του μαζικού αριθμού. Το μηδέν της ενέργειας αντιστοιχεί στην κατάσταση των ελεύθερων νουκλεονίων. Όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο τόσο σταθερότερος ενεργειακά είναι ο πυρήνας. Η έγχρωμη περιοχή είναι αυτή των πιο ευσταθών πυρήνων.

μαζικών αριθμών (φαινόμενο **σχάσης**), η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο είναι μεγαλύτερη στους νέους πυρήνες που προκύπτουν. Ομοίως όταν δύο ή περισσότεροι πολύ ελαφροί πυρήνες στο αριστερό μέρος της καμπύλης, συνενώνονται προς σχηματισμό ενός μεγαλύτερου με $A \leq 60$ (φαινόμενο **σύντηξης**), πάλι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο είναι μεγαλύτερη στο νέο πυρήνα που προκύπτει. Συνεπώς στις διαδικασίες αυτές, οι πυρήνες που παράγονται είναι ενεργειακά σταθερότεροι και αποδεσμεύεται συνολικά ενέργεια, την οποία εκμεταλλευόμαστε.

Ας θεωρήσουμε για παράδειγμα ότι ένας πυρήνας με A=240 και ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο 7,5MeV σχάζεται σε δύο μεσαίους πυρήνες με μαζικούς αριθμούς 120 οι οποίοι έχουν ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο 8,5MeV. Η διάλυση του αρχικού πυρήνα στα νουκλεόνια που τον αποτελούν απαιτεί δαπάνη ενέργειας 240x7,5MeV=1800MeV.

Ο σχηματισμός των δύο νέων πυρήνων από τα ίδια νουκλεόνια εκλύει ενέργεια 240x8,5MeV=2040MeV. Από όλη τη διαδικασία της σχάσης αποδεσμεύεται συνεπώς ενέργεια ίση με τη διαφορά (2040-1800)MeV=240MeV την οποία ωφελούμαστε.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3 - 2

Ποιο είναι το έλλειμμα μάζας του πυρήνα $^{12}_{6}C$;

Ποια είναι η ενέργεια σύνδεσης;

Αν η ακτίνα του πυρήνα είναι της τάξης των $2,7 \times 10^{-15}$m πόση είναι η πυκνότητά του;

ΛΥΣΗ Με τις μάζες εκφρασμένες σε ατομικές μονάδες μάζας η σχέση 3.2α δίνει:

$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_\Pi$ ή

$\Delta M = 6(1,007276)u + 6(1,008665)u - [12,000u - 6(0,000549)u]$ ή $\Delta M = 0,098946u$

Ο όρος 6x0,000549u παριστάνει τη συνεισφορά σε μάζα των έξι ηλεκτρονίων του ατόμου, εφόσον το 12u είναι η μάζα ηρεμίας του ουδέτερου ατόμου του άνθρακα. Η ενέργεια σύνδεσης για τον ίδιο πυρήνα είναι:

$$E_B = 0,098946 \times 931,48\text{MeV} = 92,17\text{MeV}$$

ή διαιρώντας με το πλήθος των νουκλεονίων $E_B/12 = 7,68$MeV ανά νουκλεόνιο. Η πυκνότητά του είναι τότε:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\frac{4}{3} \cdot 3,14\, r^3} = \frac{12 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}}{4,19 \cdot 2,17^3 \cdot 10^{-45}\ \text{m}^3} = 4,6 \cdot 10^{17}\ \text{kg/m}^3$$

(Συγκρίνοντας με την πυκνότητα του νερού, που είναι μόλις 10^3kg/m^3, βλέπουμε πόσο τρομακτικά πυκνή είναι η ύλη του πυρήνα!)

Σημείωση: *Όταν κάνουμε υπολογισμούς με έλλειμμα μάζας, ενέργεια σύνδεσης κτλ., η μάζα του πυρήνα που υπεισέρχεται αναφέρεται στο γυμνό πυρήνα, χωρίς τα ηλεκτρόνια. Οι πίνακες των μαζών όμως δίνουν τη μάζα των ουδέτερων ατόμων, που περιλαμβάνει και όλα τα ηλεκτρόνιά τους. Για να βρούμε λοιπόν τη μάζα ενός γυμνού πυρήνα, όταν ενδιαφερόμαστε για ακρίβεια αρκετών δεκαδικών ψηφίων, πρέπει να αφαιρούμε τη μάζα αυτών των ηλεκτρονίων, έστω και αν είναι πολύ μικρή.*

Οι πυρηνικές δυνάμεις

Είδαμε ότι τα νουκλεόνια βρίσκονται σε μια αέναη και αδιάκοπη κίνηση μέσα στον πυρήνα. Εξαιτίας της κίνησης αυτής τα νουκλεόνια έχουν μια τεράστια κινητική ενέργεια, η οποία τείνει να τα διασκορπίσει προς τα έξω και επομένως να διαλύσει τον πυρήνα. Επιπλέον τα πρωτόνια στον πυρήνα υφίστανται την αμοιβαία ηλεκτρική άπωση, η οποία τείνει επίσης να τα εκδιώξει από τον πυρήνα.

Τότε τι είναι εκείνο που συγκρατεί το πυρηνικό «τσαμπί» ενιαίο;

Καταλήγουμε λοιπόν ότι μια και υπάρχουν πυρήνες, θα πρέπει να υπάρχει και μία άλλη δύναμη, **ισχυρότατα ελκτική**, που θα υπερνικά την ηλεκτρική άπωση και την τάση που έχουν τα νουκλεόνια να διασκορπιστούν λόγω της έντονης κίνησής τους. Μία τέτοια δύναμη πράγματι υπάρχει και είναι γνωστή με το όνομα **ισχυρή πυρηνική δύναμη**. Η δύναμη αυτή έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- **Δεν κάνει διάκριση μεταξύ πρωτονίων και νετρονίων. Είναι δηλαδή η ίδια για τα ζεύγη πρωτόνιο - πρωτόνιο, πρωτόνιο - νετρόνιο και νετρόνιο - νετρόνιο.**
- **Δρα μόνο μεταξύ γειτονικών νουκλεονίων και μόνο στις πολύ κοντινές αποστάσεις.**

Πράγματι, όταν η απόσταση μεταξύ των κέντρων δύο νουκλεονίων είναι μεγαλύτερη από $4x10^{-15}$m, η ισχυρή πυρηνική δύναμη είναι σχεδόν μηδέν.

Στο γήινο περιβάλλον και στον κόσμο γύρω μας, που γίνεται άμεσα αντιληπτός, οι πυρήνες σχεδόν ποτέ δεν πλησιάζουν ο ένας τον άλλο, γιατί οι ηλεκτρικές απώσεις δεν τους αφήνουν. Έτσι η ισχυρή πυρηνική δύναμη, που δρα μόνο «εξ επαφής», δεν γίνεται εύκολα αισθητή ούτε και επηρεάζει άμεσα τα μακροσκοπικά φαινόμενα.

Υποψιαστήκαμε για πρώτη φορά την ύπαρξή της, μόνο όταν μπορέσαμε με κατάλληλους επιταχυντές να δώσουμε υψηλές κινητικές ενέργειες σε πυρήνες κυρίως ελαφρούς, ώστε να μπορέσουν να υπερνικήσουν το φράγμα των ηλεκτρικών απώσεων και να πλησιάσουν σε απόσταση λιγότερη από $2x10^{-15}$m άλλους πυρήνες. Έτσι καταφέραμε να αλληλεπιδράσουν οι δύο πυρήνες και να σχηματιστούν νέοι πυρήνες.

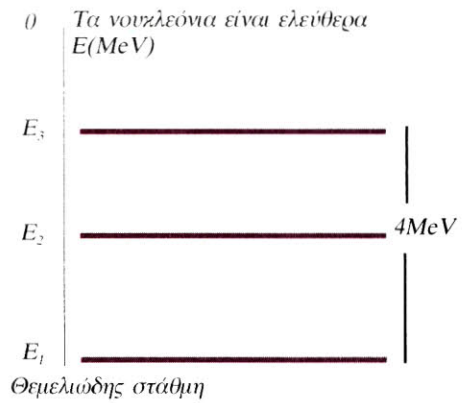
3-7 Η κινητική ενέργεια των νουκλεονίων και η απωστική δύναμη μεταξύ των πρωτονίων τείνουν να αποσυνθέσουν τον πυρήνα, ενώ η ισχυρή πυρηνική δύναμη είναι αυτή που τον κρατάει ενιαίο.

Ο πυρήνας έχει ενεργειακές στάθμες

Η ενέργεια των νουκλεονίων του πυρήνα δεν μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή, αλλά, όπως συμβαίνει και με την ενέργεια του ατόμου του υδρογόνου, είναι κβαντωμένο μέγεθος και μπορεί να πάρει μόνο διακριτές τιμές.

Τη στάθμη που αντιστοιχεί στη μικρότερη δυνατή ενέργεια τη λέμε και εδώ θεμελιώδη ενεργειακή στάθμη. Οι υπόλοιπες ενεργειακές στάθμες του πυρήνα παριστάνονται σχηματικά με μικρές οριζόντιες γραμμές πάνω από τη θεμελιώδη ενεργειακή στάθμη και ονομάζονται διεγερμένες στάθμες (σχήμα 3-8).

Οι αποστάσεις των ενεργειακών σταθμών στο άτομο του υδρογόνου είναι μερικά eV, ενώ στον πυρήνα οι αποστάσεις των ενεργειακών σταθμών είναι μερικά MeV, δηλαδή ένα εκατομμύριο φορές περισσότερο.



3-8 Οι πρώτες λίγες ενεργειακές στάθμες του πυρήνα $^{14}_{7}N$. Η θεμελιώδης ενεργειακή στάθμη αντιστοιχεί στην πιο ευσταθή κατάσταση του πυρήνα. Όλες οι στάθμες έχουν αρνητική ενέργεια. Οι διεγερμένες στάθμες έχουν απλώς μεγαλύτερη ενέργεια από τη θεμελιώδη. Κάθε φορά που ο πυρήνας, ενώ βρίσκεται σε μια διεγερμένη στάθμη, μεταπίπτει σε μια πιο χαμηλή, αποβάλλει στο περιβάλλον του ενέργεια με τη μορφή φωτονίων.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3 - 3

Για δύο πρωτόνια που βρίσκονται σε μια απόσταση $2x10^{-15}$m να συγκρίνετε τη βαρυτική, την ηλεκτρική και την πυρηνική δύναμη. Δίνεται ότι η πυρηνική δύναμη σ' αυτή την απόσταση είναι της τάξης των 10^3N.

ΛΥΣΗ Η βαρυτική και η ηλεκτρική δύναμη υπολογίζονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$F_{βαρ} = G\frac{m_p^2}{r^2} \Rightarrow$$

$$F_{βαρ} = 6{,}67\cdot 10^{-11}\frac{(1{,}67\cdot 10^{-27})^2}{(2\cdot 10^{-15})^2}N = 4{,}65\cdot 10^{-35}\ N$$

$$F_{ηλ} = k\frac{q_p^2}{r^2} \Rightarrow$$

$$F_{ηλ} = 9\cdot 10^9\frac{(1{,}6\cdot 10^{-19})^2}{(2\cdot 10^{-15})^2}N = 57{,}6\,N$$

Παρατηρούμε ότι η βαρυτική δύναμη είναι περίπου 10^{36} φορές ασθενέστερη της ηλεκτρικής.
Η πυρηνική δύναμη, σε αντίθεση, είναι της τάξης των 10^3N, δηλαδή περίπου 20 φορές ισχυρότερη της ηλεκτρικής. Επιβεβαιώνουμε έτσι ότι η βαρυτική δύναμη θεωρείται αμελητέα για μια τυπική απόσταση νουκλεονίων στον πυρήνα.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3 - 4

Ένα σωμάτιο α κατευθύνεται από πολύ μακριά, με ταχύτητα υ, μετωπικά προς πυρήνα ατομικού αριθμού Z, ο οποίος θεωρούμε ότι παραμένει ακίνητος στη θέση του.

Βρείτε την ελάχιστη απόσταση στην οποία μπορεί να πλησιάσει το σωμάτιο α ως συνάρτηση της ταχύτητάς του. Η δυναμική ενέργεια μεταξύ δύο φορτίων q_1, q_2 σε απόσταση r δίνεται από τη σχέση: $U=kq_1q_2/r$

ΛΥΣΗ Η κινητική ενέργεια του σωματίου, στο σημείο που αυτό σταματάει στιγμιαία λόγω της απωστικής ηλεκτρικής δύναμης, για να γυρίσει στη συνέχεια πίσω, έχει μετατραπεί σε δυναμική ενέργεια αλληλεπίδρασης. Η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια του συστήματος πυρήνας - σωμάτιο α δίνεται από τη σχέση:

$$U = k\frac{q_1 q_2}{r} = k\frac{(2e)(Ze)}{d}$$

όπου d η ελάχιστη απόσταση μεταξύ τους, 2e το φορτίο του σωματίου α και Ze το φορτίο του πυρήνα.
Η διατήρηση της ενέργειας δίνει για το σύστημα:

$$\frac{1}{2}m\upsilon^2 = k\frac{(2e)(Ze)}{d}$$

Λύνοντας ως προς d βρίσκουμε: $d = \frac{4kZe^2}{m\upsilon^2}$

Από τη σχέση αυτή μπορούμε να δούμε ότι για πυρήνες χρυσού, για παράδειγμα, ακόμη και αν το σωμάτιο α έχει κινητική ενέργεια περίπου 10MeV, δεν μπορεί να πλησιάσει σε απόσταση μικρότερη σ'αυτό από $23x10^{-15}$m τον πυρήνα και επομένως να γίνει αισθητή η ισχυρή πυρηνική δύναμη.

3.2 ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

Μέχρι το 1932 οι φυσικοί πίστευαν ότι όλη η ύλη αποτελείται από τέσσερα βασικά σωματίδια: ηλεκτρόνια, πρωτόνια, νετρόνια και φωτόνια. Τα σωματίδια αυτά πίστευαν ότι δε διασπώνται σε μικρότερα μέρη. Τα πρώτα νέα σωματίδια βρέθηκαν στην κοσμική ακτινοβολία που φτάνει στη Γη από το διάστημα. Μετά τη δεκαετία του '50 οι φυσικοί κατασκεύαζαν όλο και μεγαλύτερους επιταχυντές, με τους οποίους επιτάχυναν σωμάτια σε όλο και μεγαλύτερες ενέργειες και πραγματοποιούσαν κρούσεις με άλλα σωμάτια - στόχους.

Κατά τις κρούσεις αυτές κινητική ενέργεια των αρχικών σωματίων μετατρεπόταν σε μάζα των νέων σωματίων, σύμφωνα με την ισοδυναμία μάζας - ενέργειας. Έτσι είδαν να γεννιούνται όλο και νέα περισσότερα σωμάτια, τα περισσότερα από τα οποία ήταν εξαιρετικά ασταθή και βραχύβια. Μερικά από αυτά έχουν μέσο χρόνο ζωής της τάξης των 10^{-20}s. Σήμερα, που γνωρίζουμε περισσότερα από 200 «στοιχειώδη σωμάτια», ξέρουμε ότι τα περισσότερα από αυτά, συμπεριλαμβανομένων των νετρονίων και των πρωτονίων, δε θεωρούνται πια στοιχειώδη, αλλά αποτελούνται από μικρότερα σωματίδια. Έτσι επικράτησε τις πραγματικά στοιχειώδεις οντότητες της ύλης να τις ονομάζουμε **σωματίδια** και τις πιο σύνθετες **σωμάτια**.

3-9 Ο μεγάλος επιταχυντής στο CERN στη Γενεύη. Έχει περιφέρεια 27km και βρίσκεται 100m κάτω από το έδαφος. Τα σωματίδια μέσα σ' αυτόν ταξιδεύουν σχεδόν με την ταχύτητα του φωτός και διαγράφουν αυτή την περιφέρεια 11000 φορές το δευτερόλεπτο.

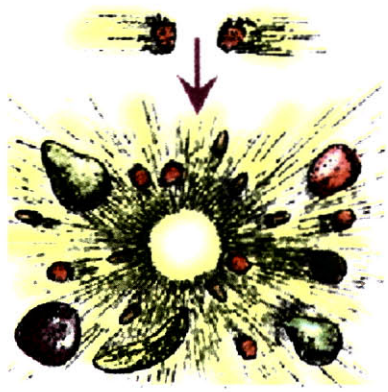
Τα αντισωμάτια

Το 1932 ο Anderson (Άντερσον) παρατήρησε για πρώτη φορά ένα σωματίδιο που ήταν σε όλα όμοιο με το ηλεκτρόνιο, αλλά έφερε το στοιχειώδες θετικό φορτίο. Το σωματίδιο αυτό ονομάστηκε **ποζιτρόνιο** (e^+) και αποτελεί το αντισωματίδιο του ηλεκτρονίου.

Στη συνέχεια ανακαλύφθηκε το **αντιπρωτόνιο** ($\bar{p}$), που είναι όμοιο με το πρωτόνιο, αλλά φέρει το στοιχειώδες αρνητικό φορτίο. Ακολούθησε η ανακάλυψη του **αντινετρονίου** ($\bar{n}$), που όμως δεν έχει φορτίο, όπως και το νετρόνιο. Το αντινετρόνιο έχει όμως άλλα χαρακτηριστικά, που είναι αντίθετα από αυτά του νετρονίου (κβαντικούς αριθμούς). Όταν το αντινετρόνιο διασπάται, παράγονται σωμάτια που είναι αντισωμάτια εκείνων που παράγονται κατά τη διάσπαση του νετρονίου.

Σε κάθε **σωμάτιο** αντιστοιχεί και ένα **αντισωμάτιο**.

Τα αντισωματίδια του φωτονίου και μερικών άλλων σωματιδίων ταυτίζονται με τα ίδια τα σωματίδια. Συνήθως τα αντισωματίδια συμβολίζονται με μια παύλα πάνω από το σύμβολο του σωματιδίου.

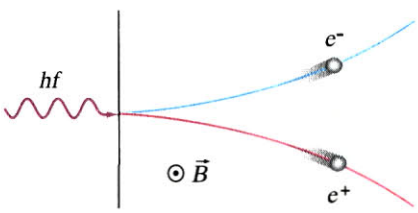


3-10 Από τη σύγκρουση δύο αρχικών σωματιδίων γεννιούνται τελείως διαφορετικά νέα σωματίδια.

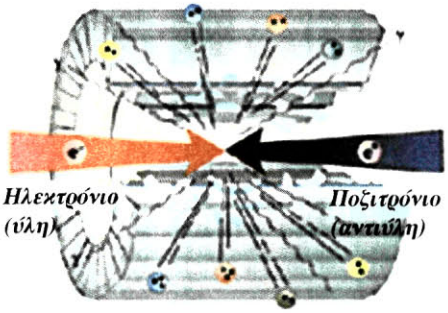
Ο πιο συνηθισμένος τρόπος δημιουργίας του ποζιτρονίου είναι το **φαινόμενο της παραγωγής ζεύγους ποζιτρονίου - ηλεκτρονίου**.

Ένα φωτόνιο υψηλής ενέργειας, καθώς αλληλεπιδρά με κάποιο πυρήνα, εξαφανίζεται και στη θέση του εμφανίζεται ένα ζεύγος (e^-, e^+). Σύμφωνα με την ισοδυναμία μάζας και ενέργειας, τα δύο σωματίδια που δημιουργούνται έχουν ενέργεια τουλάχιστον ίση με:

$$E=2m_ec^2=2(9{,}1\times10^{-31}\text{kg})(3\times10^8\text{m/sec})^2=1{,}64\times10^{-13}\text{J}=1{,}02\text{MeV}.$$



3-11 Διάγραμμα που δείχνει τη διαδικασία παραγωγής ζεύγους. Ένα φωτόνιο αλληλεπιδρά με πυρήνες σε φύλλα μολύβδου και δημιουργούνται ζεύγη (e^-, e^+). Στη συνέχεια τα σωματίδια του ζεύγους καμπυλώνονται αντίθετα μέσα σε μαγνητικό πεδίο.



3-12 Όταν ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο πλησιάζουν, εξαφανίζονται και τα δύο και ελευθερώνεται ένα αντίστοιχο ποσό ενέργειας. Σχεδόν αμέσως η ενέργεια αυτή μετατρέπεται σε σωματίδια, περίπου όπως σχηματίστηκε και η ύλη στα πρώτα στάδια του Σύμπαντος. Η διάταξη γύρω από την περιοχή της σύγκρουσης είναι ανιχνευτές που ανιχνεύουν τα παραγόμενα σωματίδια.

Την αντίστοιχη τουλάχιστον ενέργεια πρέπει να διαθέτει και το φωτόνιο που εξαφανίζεται (σχήμα 3-11).

Η αντίστροφη διαδικασία λέγεται **εξαΰλωση** και συμβαίνει όταν συγκρούεται ένα ηλεκτρόνιο με ένα ποζιτρόνιο. Τα δύο σωματίδια εξαφανίζονται και εμφανίζονται δύο ή περισσότερα φωτόνια με ολική ενέργεια τουλάχιστον $2m_ec^2$ (*). Αν η ενέργεια των αρχικών σωματιδίων είναι αρκετά μεγάλη, τότε στην τελική κατάσταση θα εμφανιστεί πλειάδα άλλων σωματίων, αλλά πάντα η συνολική ενέργεια και η ορμή πρέπει να διατηρούνται (σχήμα 3-12).

Η ταξινόμηση των σωματίων

α. Αδρόνια και quarks (κουάρκ)

Η αφθονία των σωματίων κάνει την ταξινόμησή τους μια μάλλον περίπλοκη υπόθεση. Συνήθως η ταξινόμηση των σωματίων βασίζεται στις αλληλεπιδράσεις. Τα σωμάτια που εκδηλώνουν ισχυρές αλληλεπιδράσεις λέγονται **αδρόνια**. Στα αδρόνια ανήκουν τα πρωτόνια και τα νετρόνια. Όλα τα αδρόνια έχουν δομή και αποτελούνται από πιο μικροσκοπικά συστατικά, που λέγονται **quarks**. Τα quarks έχουν ως φορτίο κλάσμα του στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου. Σήμερα πιστεύουμε ότι τα quarks δεν έχουν εσωτερική δομή. Υπάρχουν έξι quarks, στα οποία έχουμε δώσει περίεργα ονόματα και τα οποία χωρίζουμε σε τρία ζεύγη.

Τα 6 quarks εικονίζονται στο παρακάτω σχήμα:

up (πάνω) - down (κάτω),
charm (γοητεία) - strange (παράδοξο),
top (κορυφή) - bottom (πυθμένας).

Ας σημειώσουμε ότι όλα τα αδρόνια που παρατηρούμε σήμερα στο Σύμπαν είναι φτιαγμένα από το ζεύγος των quarks **up** και **down.**

Το ηλεκτρικό φορτίο του up είναι $\frac{2}{3}e$ και του down $-\frac{1}{3}e$.

Τα quarks δεν εμφανίζονται ποτέ ελεύθερα αλλά πάντα σε ομάδες με άλλα quarks. Η ομαδοποίησή τους γίνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε τα αδρόνια που σχηματίζουν να έχουν πάντα ακέραιο ηλεκτρικό φορτίο (0, ±1e, ±2e κτλ.).

Έτσι, για παράδειγμα, το πρωτόνιο αποτελείται από 2 up και 1 down (uud), ενώ το νετρόνιο από 1 up και 2 down (udd). Επίσης ένα αντιπρωτόνιο αποτελείται από ($\bar{u}\bar{u}\bar{d}$).

3-13 Murray Gell-Mann (1929) αριστερά και Richard Feynman (1918-1988) δεξιά. Η θεωρητική εργασία τους στα στοιχειώδη σωμάτια τιμήθηκε με Nobel το 1969 και 1965 αντίστοιχα.

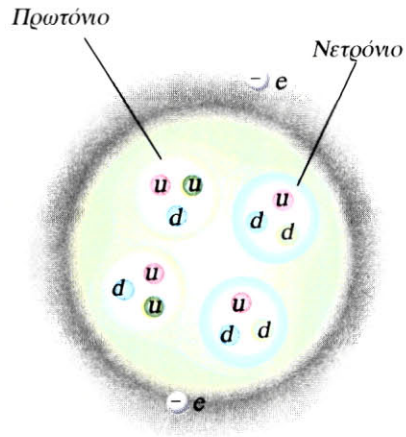
(*) Δημιουργία ενός μόνο φωτονίου μ' αυτή την ενέργεια είναι αδύνατη, γιατί θα παραβιαζόταν η αρχή διατήρησης της ορμής.

β. Λεπτόνια

Τα **λεπτόνια** είναι μια δεύτερη ανεξάρτητη κατηγορία σωματιδίων. **Το χαρακτηριστικό των λεπτονίων είναι ότι δε συμμετέχουν σε ισχυρές αλληλεπιδράσεις, δεν αποτελούν συστατικό άλλων σωματιδίων και δε δομούνται από άλλα.**

Υπάρχουν συνολικά μόνο έξι λεπτόνια. Τα τρία από αυτά, που έχουν φορτίο -1e, είναι τα: **ηλεκτρόνιο** (e^-), **μιόνιο** (μ^-) και **ταυ** (τ^-). Τα άλλα τρία είναι τα αντίστοιχα **νετρίνα**: ν_e, ν_μ, ν_τ.

Κάθε φορτισμένο λεπτόνιο από τα e, μ, τ έχει το δικό του νετρίνο ν_e, ν_μ, ν_τ, που το συνοδεύει στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις του.



3-14 Τα πρωτόνια και τα νετρόνια του πυρήνα αποτελούνται από τρία quarks το καθένα.

γ. Τα σωματίδια φορείς δυνάμεων

Οι διάφορες αλληλεπιδράσεις (συχνά ονομάζονται και δυνάμεις) που γνωρίζουμε σήμερα, με σειρά μειούμενης ισχύος, είναι:

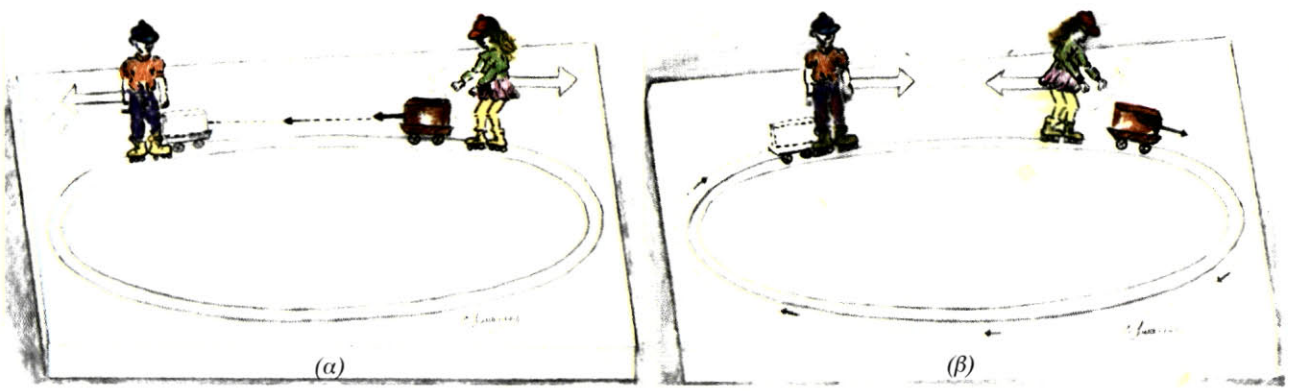
1. η ισχυρή αλληλεπίδραση,
2. η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση,
3. η ασθενής αλληλεπίδραση,
4. η βαρυτική αλληλεπίδραση.

- Οι ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις μεταξύ των νουκλεονίων του πυρήνα και γενικότερα μεταξύ των αδρονίων είναι αποτέλεσμα της ισχυρής αλληλεπίδρασης.
- Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των φορτίων στα φαινόμενα του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού είναι αποτέλεσμα της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης.
- Η ασθενής αλληλεπίδραση είναι υπεύθυνη για πολλές από τις αλληλεπιδράσεις των λεπτονίων. Είναι υπεύθυνη για την εκπομπή ηλεκτρονίων από τους πυρήνες, όπως θα δούμε στην επόμενη ενότητα 3.3. Η ασθενής αλληλεπίδραση είναι μικρής εμβέλειας, όπως και η ισχυρή, αλλά είναι πολύ ασθενέστερη.
- Οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ μαζών που κυριαρχούν στο μακρόκοσμο είναι αποτέλεσμα της βαρυτικής αλληλεπίδρασης.

e^- ηλεκτρόνιο	ν_e νετρίνο-e
μ^- μιόνιο	ν_μ νετρίνο-μ
τ^- ταυ	ν_τ νετρίνο-τ

3-15 Τα αντίστοιχα ζεύγη των λεπτονίων. Καθένα από τα e^-, μ^- και τ^- έχει το δικό του νετρίνο.

3-16 Μια παραστατική αναλογία του φορέα της δύναμης φαίνεται στο σχήμα. Δύο παιδιά ανταλλάσσουν ένα βαγονάκι με δύο διαφορετικούς τρόπους. Στην εικόνα (α) η ανταλλαγή οδηγεί σε άπωση, ενώ στην εικόνα (β) σε έλξη.



Η σύγχρονη Φυσική εξηγεί όλες τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων ως ανταλλαγή κάποιων άλλων σωματιδίων που τα θεωρεί φορείς των συγκεκριμένων αλληλεπιδράσεων.

- Τα σωματίδια φορείς της ισχυρής αλληλεπίδρασης λέγονται **γκλουόνια** (gluons).
- Τα σωματίδια φορείς της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης είναι τα **φωτόνια**. Έτσι, για παράδειγμα, οι φυσικοί εξηγούν την αλληλεπίδραση μεταξύ δύο ηλεκτρονίων ως ανταλλαγή ενός φωτονίου που εκπέμπεται από το ένα και απορροφάται από το άλλο.
- Τα σωματίδια φορείς της ασθενούς αλληλεπίδρασης είναι τα $\mathbf{W^+}$, $\mathbf{W^-}$ και $\mathbf{Z^o}$.
- Κατ' αναλογία πιστεύουμε σήμερα ότι το σωματίδιο φορέας της βαρυτικής αλληλεπίδρασης είναι το **βαρυτόνιο**, χωρίς ακόμη να υπάρχουν θεωρητικές και πειραματικές ενδείξεις.

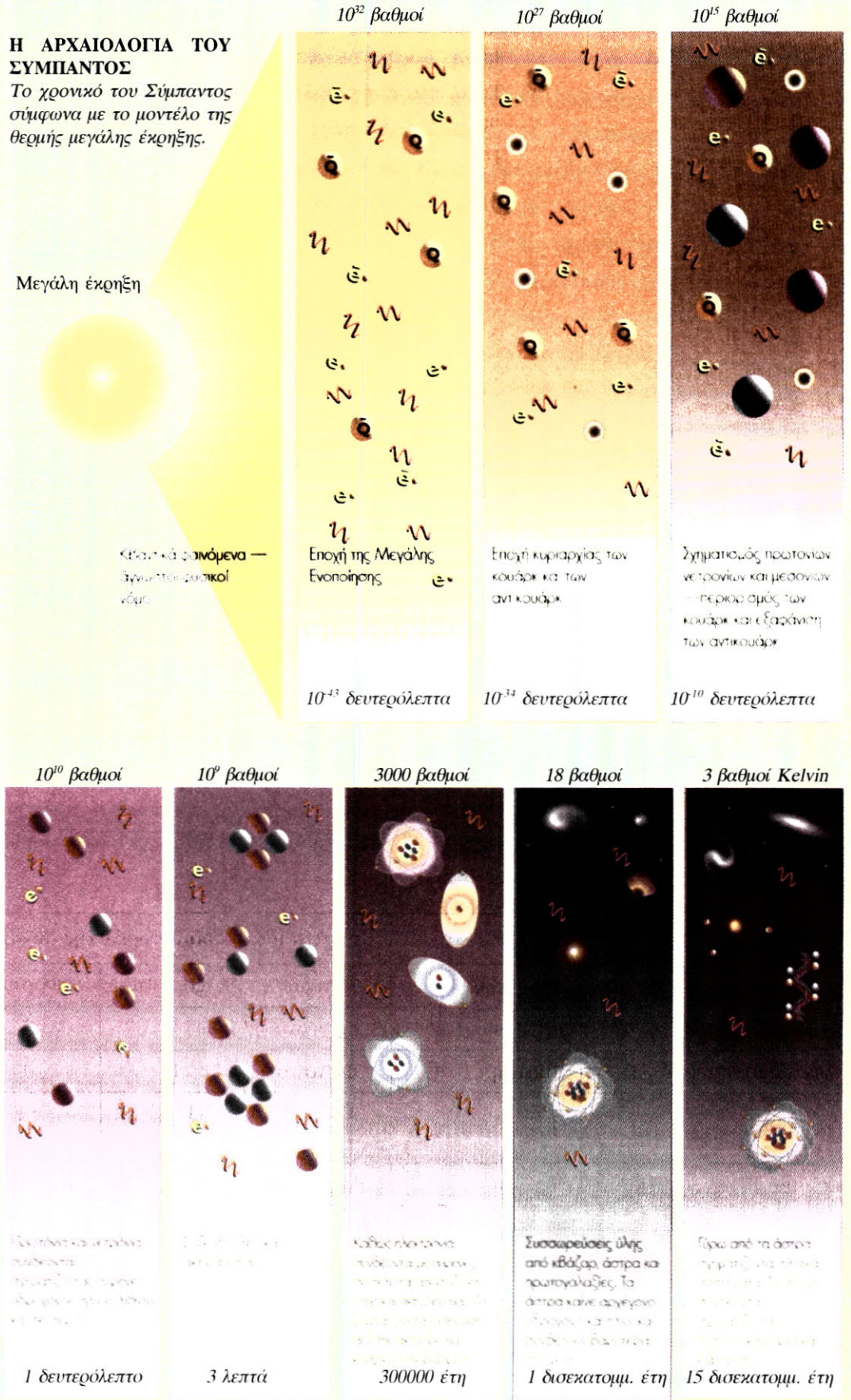
Τα 6 quarks, τα 6 λεπτόνια, τα αντισωματίδιά τους και τα σωματίδια φορείς των αλληλεπιδράσεων αποτελούν σήμερα τις θεμελιώδεις οντότητες με τις οποίες η σύγχρονη Φυσική αντιλαμβάνεται και περιγράφει τις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις και την εξέλιξη του κόσμου από τις αρχέγονες στιγμές της γέννησής του μέχρι σήμερα.

Σήμερα, ύστερα από 15 δισεκατομμύρια χρόνια από τη γέννηση του Σύμπαντος, **στην ύλη που παρατηρούμε υπάρχουν μόνο τα πιο σταθερά των στοιχειωδών σωματιδίων, δηλαδή τα up και down quarks, που συγκροτούν τα νουκλεόνια, τα ηλεκτρόνια, τα νετρίνα, και οι φορείς των αλληλεπιδράσεων**.

Πίνακας 3.3 ΤΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΦΟΡΕΙΣ ΤΩΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΩΝ

			Στοιχεία σωματιδίου φορέα της δύναμης		
Αλληλεπίδραση	Ισχύς	Εμβέλεια	Όνομα	Μάζα ηρεμίας	Φορτίο
Ισχυρή	60	περίπου 10^{-15}m	Γκλουόνιο	0	0
Ηλεκτρομαγ/κή	1	άπειρη	Φωτόνιο	0	0
Ασθενής	10^{-4}	περίπου 10^{-18}m	W^+, W^- Z^o	80,41GeV/c^2 91,187GeV/c^2	±e 0
Βαρυτική	10^{-41}	άπειρη	Βαρυτόνιο	0	0

Οι αλληλεπιδράσεις αναφέρονται σε δύο quarks μέσα σε ένα νουκλεόνιο. Ο όρος «ισχύς» αναφέρεται στο πόσο ισχυρότερες είναι οι διάφορες αλληλεπιδράσεις σε σχέση με την ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση που ελήφθη ως μονάδα σύγκρισης. Η «εμβέλεια» παριστάνει τη μέγιστη απόσταση στην οποία εκδηλώνεται κάθε αλληλεπίδραση.



Εικόνα από το βιβλίο του STEPHEN HAWKING «Το χρονικό του χρόνου».

Οι περισσότεροι από τους πυρήνες, που υπάρχουν στη φύση ή έχουν παραχθεί τεχνητά στο εργαστήριο, είναι ασταθείς. Διασπώνται δηλαδή σε άλλους πυρήνες οι οποίοι είναι σταθερότεροι.

Γιατί όμως μερικοί πυρήνες είναι σταθεροί και άλλοι όχι;

Γενικά το θέμα αυτό είναι πολύπλοκο. Ωστόσο μερικά γενικά χαρακτηριστικά μπορούν να γίνουν κατανοητά από το ακόλουθο παράδειγμα:

Ας θεωρήσουμε έναν πυρήνα με μεγάλο ατομικό αριθμό Z, στον οποίο οι ηλεκτρικές απωστικές δυνάμεις μεταξύ των πρωτονίων μόλις που αντισταθμίζονται από τις ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις, που όμως δρουν μόνο μεταξύ γειτονικών νουκλεονίων. Αν συνεχίσουμε να προσθέτουμε πρωτόνια, ο πυρήνας γίνεται αρκετά μεγάλος και οι ηλεκτρικές απωστικές δυνάμεις υπερισχύουν των πυρηνικών με αποτέλεσμα τη διάσπαση του πυρήνα.

Αυτός είναι και ο λόγος που οι μεγάλοι πυρήνες έχουν πιο πολλά νετρόνια από ό,τι πρωτόνια. Το πλεόνασμα των νετρονίων συμβάλλει στην ισχυρή πυρηνική σύνδεση, χωρίς να συνοδεύεται από παράλληλη αύξηση της άπωσης Coulomb.

Η διαδικασία κατά την οποία ένας πυρήνας μετατρέπεται σε έναν άλλο διαφορετικού στοιχείου ονομάζεται μεταστοιχείωση.

Όταν ένας πυρήνας μετατρέπεται αυθόρμητα σε άλλο πυρήνα, εκλύεται ενέργεια με ταυτόχρονη εκπομπή ακτινοβολίας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ραδιενέργεια.

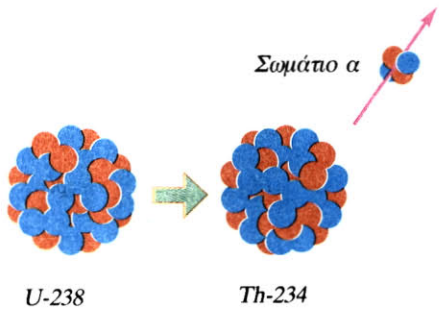
Η έκλυση της ενέργειας γίνεται συνήθως με έναν από τους τρεις τρόπους που περιγράφονται παρακάτω. Οι έννοιες της εκπομπής σωματίων α, σωματιδίων β και φωτονίων γ, που περιγράφονται παρακάτω, αποδίδονται και ως ακτινοβολίες α, β και γ αντίστοιχα.

Διάσπαση α

Το **σωμάτιο α** είναι ένας πυρήνας ηλίου ($^{4}_{2}He$). Αποτελείται δηλαδή από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια.

Όταν συμβαίνει εκπομπή σωματίων α από ένα βαρύ πυρήνα, που λέγεται **μητρικός**, ο μαζικός αριθμός μειώνεται κατά 4 και ο νέος πυρήνας, που λέγεται **θυγατρικός**, είναι σταθερότερος. Δηλαδή ισχύει:

$$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}Y + ^{4}_{2}He$$



3-17 Διάσπαση α του U-238 σε Th-234 με ταυτόχρονη εκπομπή σωματίου α.

Ας θεωρήσουμε, για παράδειγμα, τη ραδιενεργό διάσπαση α του ουρανίου ($^{238}_{92}U$).

$$^{238}_{92}U \rightarrow ^{234}_{90}Th + ^{4}_{2}He$$

Παρατηρούμε ότι ο αριθμός των πρωτονίων στο αριστερό μέλος είναι ίσος με τον αντίστοιχο στο δεξιό μέλος (δηλαδή 92=90+2), επειδή αυτό επιβάλλει η διατήρηση του φορτίου.

Επίσης ο συνολικός μαζικός αριθμός στο αριστερό μέλος είναι ίσος με τον αντίστοιχο στο δεξιό μέλος (δηλαδή 238=234+4), επειδή

αυτό επιβάλλει η διατήρηση του συνολικού αριθμού των νουκλεονίων. Θα δούμε και σε άλλες παραγράφους ότι οι διατηρήσεις αυτές πρέπει να ικανοποιούνται σε κάθε πυρηνική αντίδραση.

Όταν συμβαίνει μία διάσπαση α, η μάζα του μητρικού πυρήνα είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των μαζών του θυγατρικού πυρήνα και του σωματίου α. Κατά τη διάσπαση η διαφορά των μαζών εκδηλώνεται ως κινητική ενέργεια του θυγατρικού πυρήνα και του σωματίου α.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3 - 5

Ο πυρήνας $^{226}_{88}Ra$ διασπάται με εκπομπή σωματίου α. Ποιος θυγατρικός πυρήνας σχηματίζεται;

ΛΥΣΗ Η διάσπαση μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{A}_{Z}X + {}^{4}_{2}He$$

Η σύγκριση των ατομικών και μαζικών αριθμών δεξιά και αριστερά του βέλους μάς δείχνει ότι ο θυγατρικός πυρήνας έχει Z=86 και A=222.

Ο πυρήνας που αντιστοιχεί στα στοιχεία αυτά είναι του ραδονίου $^{222}_{86}Rn$. Έτσι η διάσπαση είναι:

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3 - 6

Στην παραπάνω διάσπαση, αν γνωρίζουμε ότι η μάζα του $^{226}_{88}Ra$ είναι 226,025406u, η μάζα του $^{222}_{86}Rn$ είναι 222,017574u και αυτή του $^{4}_{2}He$ είναι 4,002603u, βρείτε την ενέργεια που ελευθερώνεται κατά τη διάσπαση.

ΛΥΣΗ Μετά τη διάσπαση το άθροισμα των μαζών του θυγατρικού πυρήνα και του σωματίου α είναι:

$$m_\theta + m_\alpha = 222{,}017574u + 4{,}002603u = 226{,}020177u$$

Έτσι η μάζα που χάθηκε κατά τη διάσπαση είναι:

$$m_{Ra} - (m_\theta + m_a) = 226{,}025406u - 226{,}020177u = 0{,}005229u$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση 1u=931,5MeV βρίσκουμε ότι η ενέργεια που ελευθερώνεται είναι:

$$E = (0{,}005229u) x (931{,}5MeV/u) = 4{,}87MeV$$

Ας σημειωθεί ότι το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ενέργειας αποτελεί κινητική ενέργεια του σωματιδίου α.

Διάσπαση β

Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο εκπέμπεται από τον πυρήνα ένα ηλεκτρόνιο (διάσπαση β^-) ή ένα ποζιτρόνιο (διάσπαση β^+).

Έτσι, για παράδειγμα, ο πυρήνας $^{14}_{6}C$ διασπάται σε πυρήνα $^{14}_{7}N$, ενώ συγχρόνως εκπέμπεται και ένα ηλεκτρόνιο.

Το γεγονός ότι κατά τη διάσπαση ενός πυρήνα μπορεί να εκπέμπεται ένα ηλεκτρόνιο δε σημαίνει ότι το ηλεκτρόνιο αυτό προϋπήρχε μέσα στο μητρικό πυρήνα. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι η εκπομπή ενός ηλεκτρονίου οφείλεται στη διάσπαση ενός νετρονίου του πυρήνα σε ένα πρωτόνιο, ένα ηλεκτρόνιο και ένα αντινετρίνο:

$$^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Έτσι ο αριθμός των πρωτονίων Z στο θυγατρικό πυρήνα αυξάνεται κατά 1, ενώ ο αριθμός των νετρονίων μειώνεται κατά 1, οπότε ο συνολικός αριθμός των νουκλεονίων A δε μεταβάλλεται.

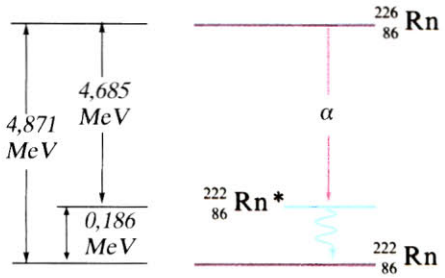
Η αντίδραση που παριστάνει την παραπάνω ραδιενεργό διάσπαση του $^{14}_{6}C$ είναι η ακόλουθη:

3-18 *Τα νετρίνα αλληλεπιδρούν τόσο ασθενικά με την ύλη, ώστε πολύ δύσκολα μπορούμε να τα παρατηρήσουμε. Ένα νετρίνο μπορεί να περάσει μέσα από τη Γη σαν να μην υπήρχε καθόλου αυτή.*

$$^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + e^{-} + \overline{\nu}_e$$

Η αλληλεπίδραση που είναι υπεύθυνη για τη μεταλλαγή αυτή είναι η ασθενής αλληλεπίδραση μεταξύ των quarks του νετρονίου. Τα σωματίδια β, επειδή φέρουν φορτίο, μπορούν να ανιχνευτούν. Οι ταχύτητές τους φτάνουν ακόμη και το 99,9% της ταχύτητας του φωτός.

Επειδή το αντινετρίνο αλληλεπιδρά πολύ ασθενικά με την ύλη, η παρατήρησή του είναι εξαιρετικά δύσκολη. Παρουσιάζει μάλιστα ιστορικό ενδιαφέρον ότι, όταν παρατηρήθηκε η παραπάνω διάσπαση β, το νετρίνο δεν ήταν γνωστό και με τα πειραματικά μέσα της εποχής δεν μπορούσε να ανιχνευτεί. Την ύπαρξή του ως άγνωστο σωματίδιο πρότεινε ο Pauli (Πάουλι) το 1930, για να μπορεί να ισχύει η διατήρηση της ενέργειας και της ορμής στη διάσπαση του $^{14}_{6}C$. Η παρατήρηση του νετρίνου έγινε πολύ αργότερα, το 1950.



3-19 Αποδιέγερση πυρήνα Rn με εκπομπή ακτινοβολίας γ.*

Διάσπαση γ

Πολύ συχνά ένας πυρήνας, μετά από μία διάσπαση α ή β, μεταστοιχειώνεται σε άλλο πυρήνα, ο οποίος βρίσκεται σε μία διεγερμένη ενεργειακή στάθμη. Ο νέος πυρήνας τότε μεταπίπτει σε μία χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη με ταυτόχρονη εκπομπή ενός ή περισσότερων φωτονίων. Η διαδικασία αυτή είναι παρόμοια με τη διαδικασία εκπομπής φωτός από άτομα, όταν ηλεκτρόνια μεταπίπτουν από ανώτερες ενεργειακές στάθμες σε χαμηλότερες.

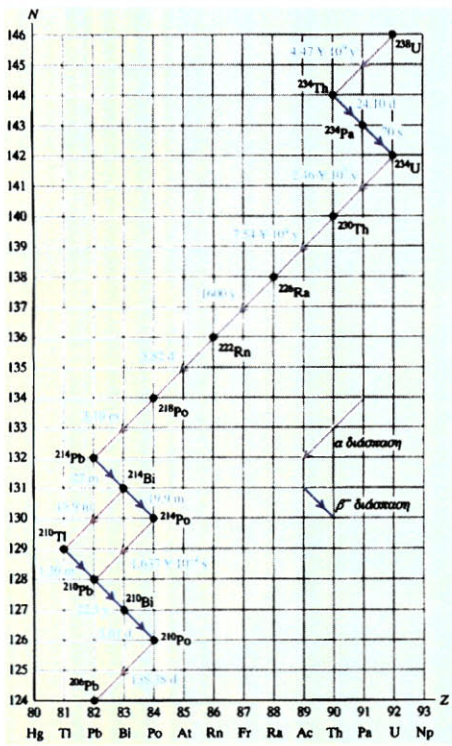
Τα φωτόνια που εκπέμπονται κατά τις αποδιεγέρσεις πυρήνων ονομάζονται **ακτίνες** ή **σωματίδια** γ και έχουν πολύ υψηλές ενέργειες σε σχέση με τις ενέργειες των φωτονίων του ορατού φωτός. Ένα παράδειγμα εκπομπής ακτίνων γ παριστάνεται ως εξής:

$$^{222}_{86}Rn^{*} \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + \gamma \qquad \text{(σχήμα 3-19)}$$

Το σύμβολο (*) δηλώνει διεγερμένη στάθμη.

Ας σημειωθεί ότι κατά την εκπομπή της ακτινοβολίας γ δεν αλλάζει ούτε το Z ούτε το A του πυρήνα.

Στη φύση υπάρχουν πολλά ραδιενεργά στοιχεία που διασπώνται αυθόρμητα. Συχνά, όταν ένας ραδιενεργός πυρήνας διασπάται, ο θυγατρικός πυρήνας μπορεί να είναι κι αυτός ασταθής. Τότε συμβαίνει μια σειρά διαδοχικών διασπάσεων, μέχρι να καταλήξουμε σε ένα σταθερό πυρήνα.



3-20 Ο ραδιενεργός πυρήνας που απαντάται πιο συχνά στη φύση είναι του U-238, ο οποίος με μια σειρά από 14 διασπάσεις, οι οποίες αποτελούνται από 8 εκπομπές α και 6 εκπομπές β, καταλήγει στο σταθερό ισότοπο του Pb-206.

Διεισδυτική ικανότητα των σωματιδίων α, β και γ

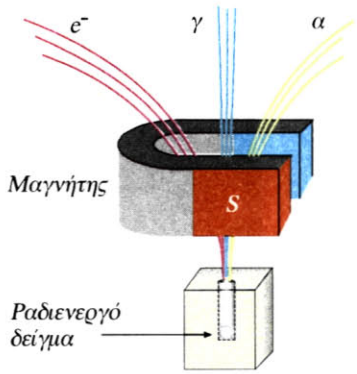
Τα σωματίδια α, β και γ, που εκπέμπονται στις διασπάσεις α, β και γ των πυρήνων, έχουν διαφορετική διεισδυτική ικανότητα. Δηλαδή:

- Τα σωμάτια α μόλις που διαπερνούν ένα φύλλο χαρτιού.
- Τα σωματίδια β μπορούν να διαπεράσουν φύλλα αλουμινίου πάχους λίγων εκατοστών.
- Τα σωματίδια γ μπορούν να διαπεράσουν αρκετά εκατοστά μολύβδου. Λόγω της μεγάλης διεισδυτικής ικανότητας απαιτούνται αυξημένα μέτρα προφύλαξης από αυτά.

Τα σωματίδια α και β, επειδή είναι φορτισμένα, κατά τη διέλευσή τους μέσα από την ύλη χάνουν σταδιακά την ενέργειά τους αλληλεπιδρώντας ηλεκτρικά με αυτήν. Τα φωτόνια γ στην πορεία τους είτε χάνουν όλη την ενέργειά τους με μία αλληλεπίδραση κατα την οποία απορροφώνται είτε περνούν ανεπηρέαστα.

Διαχωρισμός των σωματιδίων α, β και γ

Τα σωματίδια α, β και γ μπορούν να διαχωριστούν με τη βοήθεια ενός μαγνητικού πεδίου. Τα θετικά φορτισμένα σωμάτια α αποκλίνουν προς μια κατεύθυνση από το πεδίο, τα αρνητικά φορτισμένα σωματίδια β αποκλίνουν προς την αντίθετη κατεύθυνση και η ηλεκτρικά ουδέτερη ακτινοβολία γ δεν αποκλίνει καθόλου (σχήμα 3-21).



3-21 Διαχωρισμός ακτινοβολιών α, β και γ από μαγνητικό πεδίο.

Ρυθμοί διάσπασης - Χρόνος υποδιπλασιασμού

Ας θεωρήσουμε ένα δείγμα από άτομα ραδιενεργού στοιχείου. Ο αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων ελαττώνεται, καθώς αυτοί διασπώνται. Το φαινόμενο όμως αυτό είναι καθαρά στατιστικό. Κανείς δεν μπορεί να προβλέψει ποιος πυρήνας θα διασπαστεί και ποια χρονική στιγμή.

Έστω ότι κάποια χρονική στιγμή υπάρχουν N αδιάσπαστοι πυρήνες. Ο αριθμός των διασπάσεων ΔN, που θα συμβούν κατά το αμέσως επόμενο στοιχειώδες χρονικό διάστημα Δt, είναι σύμφωνα με τη στατιστική ανάλογος του αριθμού N και του χρονικού διαστήματος Δt. Δηλαδή:

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t \qquad (3.3)$$

Το λ ονομάζεται σταθερά της διάσπασης. Το πρόσημο (-) δηλώνει ότι πρόκειται για μείωση του αριθμού των πυρήνων. Η παραπάνω σχέση γράφεται και ως εξής:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N \qquad (3.4)$$

και δηλώνει ότι ο ρυθμός μεταβολής του N είναι κάθε χρονική στιγμή ανάλογος του N.

Η σταθερά λ είναι μεγάλη για ραδιενεργούς πυρήνες που διασπώνται γρήγορα και μικρή γι' αυτούς που διασπώνται αργά.

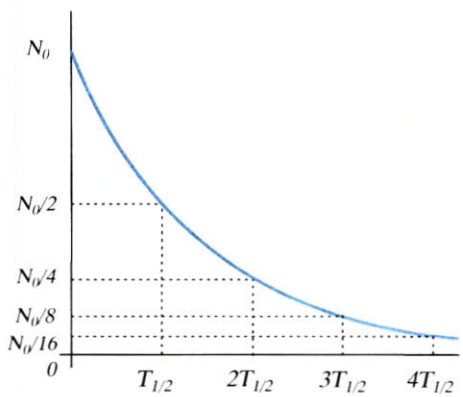
Η απόλυτη τιμή του ρυθμού μεταβολής του αριθμού των πυρήνων ονομάζεται **ενεργότητα του δείγματος**. Στο S.I. (διεθνές σύστημα μονάδων) μονάδα ενεργότητας είναι το **1 Becquerel (1Bq)** και ορίζεται ως μία διάσπαση ανά δευτερόλεπτο (1Bq=1 διάσπαση/s).

Ο **χρόνος υποδιπλασιασμού** ή **ημιζωή** $T_{½}$ είναι ο χρόνος που απαιτείται, ώστε ο αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων να μειωθεί στο μισό του αρχικού αριθμού N_0. Στη συνέχεια πάλι οι μισοί από εκείνους που απομένουν διασπώνται μέσα στο επόμενο διάστημα$T_{½}$ κ.ο.κ.

Στο σχήμα 3-22 φαίνεται ότι ο αριθμός των πυρήνων που απομένουν, μετά από διαδοχικά χρονικά διαστήματα $T_{½}$, είναι $N_0/2$ $N_0/4$, $N_0/8$ κ.ο.κ.

Αποδεικνύεται ότι η μαθηματική μορφή της καμπύλης του σχήματος είναι:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \qquad (3.5)$$



3-22 Καμπύλη διάσπασης για ένα δείγμα ραδιενεργού στοιχείου.

Αν στη σχέση 3.5 βάλουμε $N=N_0/2$ έχουμε:

$$\frac{N_0}{2}=N_0\,e^{-\lambda T_{1/2}} \text{ ή } \frac{1}{2}=e^{-\lambda T_{1/2}}$$

από όπου λογαριθμίζοντας παίρνουμε τη σχέση που συνδέει την ημιζωή με τη σταθερά λ. Δηλαδή:

$$T_{1/2}=\frac{\ln 2}{\lambda}=\frac{0,693}{\lambda} \qquad (3.6)$$

Εξετάζοντας τους γνωστούς χρόνους υποδιπλασιασμού διαπιστώνουμε μια αφάνταστα μεγάλη ποικιλία. Στο ένα άκρο βρίσκονται μερικά εξαιρετικά βραχύβια στοιχειώδη σωματίδια με χρόνους υποδιπλασιασμού 10^{-20}s ή και λιγότερο. Στο άλλο άκρο βρίσκονται οι ραδιενεργοί πυρήνες με χρόνους υποδιπλασιασμού που κυμαίνονται από 10^{-3}s μέχρι και περισσότερο από 10^{15}χρόνια.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3 - 7

Ο $^{12}_{6}C$ είναι ένα ραδιενεργό ισότοπο, που έχει ημιζωή 5730 χρόνια. Αν αρχικά σε ένα δείγμα υπήρχαν 1600 πυρήνες, πόσοι θα απέμεναν αδιάσπαστοι μετά από 22920 χρόνια;

ΛΥΣΗ Αφού μετά από 5730 χρόνια απομένουν περίπου οι μισοί πυρήνες, δηλαδή 800, μετά από άλλα 5730 χρόνια απομένουν περίπου 400 και τέλος σε 4 ημιζωές (22920 χρόνια) απομένουν περίπου 100 πυρήνες.
Βέβαια δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι το φαινόμενο είναι στατιστικό και ο αριθμός των 1600 πυρήνων είναι σχετικά μικρός, για να ισχύουν με ακρίβεια οι στατιστικοί νόμοι.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3 - 8

Το ραδιενεργό ^{57}Co εκπέμπει σωμάτια β και έχει χρόνο υποδιπλασιασμού 272 ημέρες.
α. Βρείτε τη σταθερά διάσπασής του.
β. Πόσους ραδιενεργούς πυρήνες πρέπει να έχει μια πηγή Co, ώστε να παρουσιάζει ενεργότητα $3,7\times10^4$ Bq;
γ. Πόση ενεργότητα θα έχει μετά από 272 ημέρες;

ΛΥΣΗ α. Ο χρόνος υποδιπλασιασμού είναι:

$T_{1/2}$=(272 ημέρες)(86400s/ημέρα)=$23,5\times10^6$s.

Συνεπώς η σταθερά διάσπασης είναι:

$\lambda=0,693/23,5\times10^6 s=29,5\times10^{-9}s^{-1}$

β. Η ενεργότητα είναι η απόλυτη τιμή του ρυθμού διάσπασης και αυτή ισούται με λN.
Συνεπώς $-\Delta N/\Delta t = \lambda N$ και

$$N=\frac{-\Delta N/\Delta t}{\lambda}=\frac{3,7\cdot10^4\,s^{-1}}{29,5\cdot10^{-9}\,s^{-1}}=1,25\cdot10^{12} \text{ πυρήνες}$$

γ. Μετά από 272 ημέρες ο αριθμός των πυρήνων θα έχει ελαττωθεί στο μισό, οπότε και η ενεργότητα θα είναι η μισή, δηλαδή $1,85\times10^4$ Bq.

Ραδιοχρονολόγηση

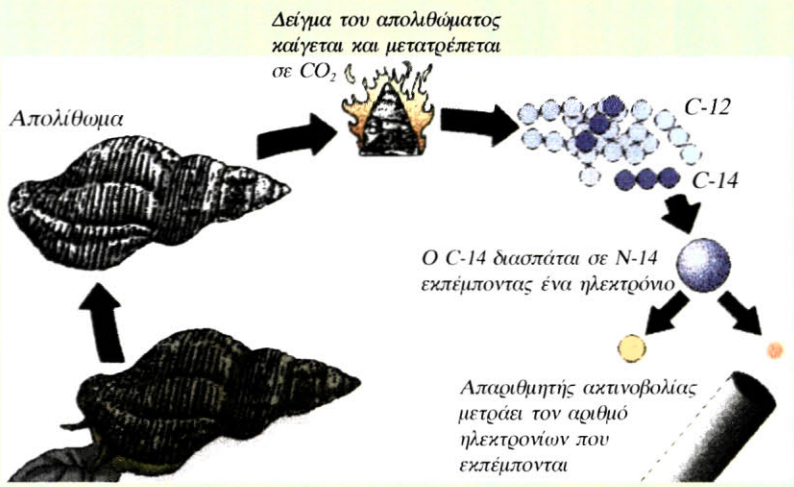
Η διάσπαση β του $^{14}_{6}C$ βρίσκει μία από τις πιο συνηθισμένες εφαρμογές στη χρονολόγηση οργανικών δειγμάτων. Ο $^{14}_{6}C$ δημιουργείται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας ως αποτέλεσμα πυρηνικών αντιδράσεων που προκαλούνται από σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας. Η αναλογία του $^{14}_{6}C$ προς τον $^{12}_{6}C$ είναι σταθερή στην ατμόσφαιρα και ίση περίπου με $1,3\times10^{-12}$.

Όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί έχουν την ίδια αναλογία του $^{14}_{6}C$ προς τον $^{12}_{6}C$ λόγω του ότι παίρνουν άνθρακα από το φυσικό τους περιβάλλον και αποβάλλουν συνεχώς διοξείδιο του άνθρακα στο περιβάλλον τους.

Όταν όμως ο οργανισμός πεθάνει, σταματάει να προσλαμβάνει άνθρακα και η αναλογία του $^{14}_{6}C$ προς τον $^{12}_{6}C$ ελαττώνεται ως αποτέλεσμα της διάσπασης β του $^{14}_{6}C$.

Μετρώντας σήμερα την ενεργότητα ανά μονάδα μάζας σε δείγματα από οργανικά υλικά, προσδιορίζουμε το ποσοστό του $^{14}_{6}C$ που έχει απομείνει και έτσι μπορούμε να προσδιορίσουμε και το χρονικό διάστημα που παρήλθε μετά το θάνατο του οργανισμού από τον οποίο προήλθε το οργανικό υλικό.

Παρόμοιες τεχνικές χρησιμοποιούνται και για τη χρονολόγηση γεωλογικών δειγμάτων. Αρχικά ένα πέτρωμα περιείχε μόνο το ισότοπο ^{40}K. Με την πάροδο του χρόνου η διάσπαση του ^{40}K έδωσε ^{40}Ar με χρόνο ημιζωής $1,28x10^9$ χρόνια. Η ηλικία του πετρώματος βρίσκεται με σύγκριση των συγκεντρώσεων των στοιχείων ^{40}K και ^{40}Ar.



3-23 *Οι παλαιοντολόγοι μπορούν να υπολογίσουν την ηλικία ενός απολιθώματος μετρώντας την ποσότητα του C-14 που περιέχει.*

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3 - 9

Η ενεργότητα του ατμοσφαιρικού άνθρακα, που οφείλεται στην παρουσία του $^{14}_{6}C$, είναι 0,255Bq ανά γραμμάριο άνθρακα. Στην ανάλυση ενός αρχαιολογικού δείγματος, που περιέχει 0,4g άνθρακα, παρατηρήθηκαν 0,0386 διασπάσεις/s.

Πόση είναι η ηλικία του δείγματος; Ο χρόνος ημιζωής του $^{14}_{6}C$ είναι 5730 χρόνια.

ΛΥΣΗ Αν το ποσοστό του $^{14}_{6}C$ ήταν το ίδιο όπως στην ατμόσφαιρα, η ενεργότητά του θα ήταν (0,255Bq/gr)x 0,4gr=0,102Bq. Ο παρατηρούμενος όμως ρυθμός διάσπασης είναι 0,0386Bq. Αυτό σημαίνει ότι η αναλογία του σημερινού αριθμού του $^{14}_{6}C$ προς αυτόν που υπήρχε την εποχή που πέθανε ο οργανισμός του δείγματος είναι:

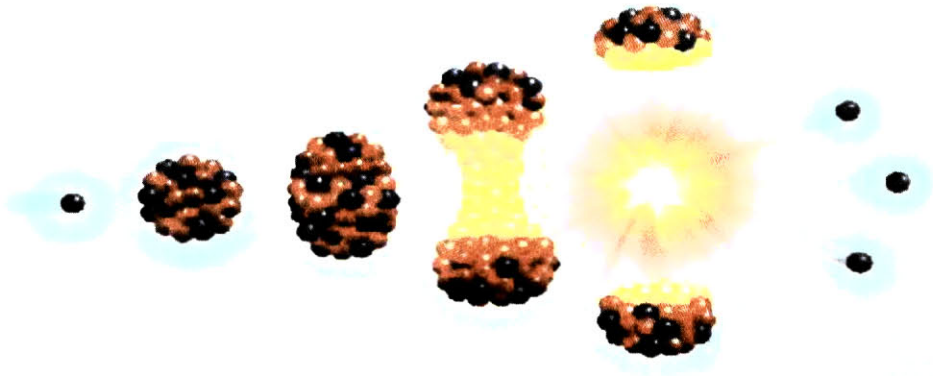
$\frac{N}{N_0} = \frac{0,0386}{0,102} = 0,378$. Λογαριθμίζουμε τώρα την εξίσωση $N = N_0 e^{-\lambda t}$, λύνουμε ως προς t και βρίσκουμε:

$$t = \frac{\ln(N_0/N)}{\lambda} = \frac{0,971}{1,21 \cdot 10^{-4} \cdot \chi\rho^{-1}} = 8030 \text{ χρόνια}$$

Η σταθερά λ έχει την τιμή: $\lambda = \frac{0,693}{5730\chi\rho} = 1,21 \cdot 10^{-4}\ \chi\rho^{-1}$

3.4 ΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ

Κατά το βομβαρδισμό πυρήνων - στόχων με κινούμενα σωματίδια συχνά παρατηρούνται νέοι πυρήνες μετά την κρούση. Τέτοιες κρούσεις ονομάζονται **πυρηνικές αντιδράσεις**.



3-24 Αναπαράσταση πυρηνικής αντίδρασης μετά από σύλληψη νετρονίου από πυρήνα.

Ο Rutherford ήταν ο πρώτος που παρατήρησε πυρηνικές αντιδράσεις κατά το βομβαρδισμό πυρήνων αζώτου με σωμάτια α. Η διαδικασία που συνέβη μπορεί να παρασταθεί ως εξής:

$$^{4}_{2}He + ^{14}_{7}N \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H$$

Στις πυρηνικές αντιδράσεις ισχύουν οι νόμοι διατήρησης του φορτίου, της ορμής και της ενέργειας. Στην τελευταία συμπεριλαμβάνονται η κινητική ενέργεια και η ενέργεια που αντιστοιχεί στη μάζα ηρεμίας. **Ένας πρόσθετος νόμος διατήρησης είναι η διατήρηση του συνολικού αριθμού των νουκλεονίων**. Στην παραπάνω αντίδραση η διατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται από την εξισορρόπηση των μαζικών αριθμών στα δύο μέλη της αντίδρασης. Επίσης **η διατήρηση του φορτίου επιβάλλει να ισούται το άθροισμα των αρχικών ατομικών αριθμών με το άθροισμα των τελικών ατομικών αριθμών**.

Η διαφορά των μαζών ηρεμίας πριν και μετά την αντίδραση προσδιορίζει την ενέργεια Q της αντίδρασης, σύμφωνα με την ισοδυναμία μάζας και ενέργειας.

Έτσι στην αντίδραση $A+B \rightarrow Γ+Δ$ η ενέργεια Q της αντίδρασης ορίζεται ως:

$$Q = (M_A + M_B - M_Γ - M_Δ)c^2 \qquad (3.7)$$

Όταν το Q είναι θετικό, η μάζα των προϊόντων είναι μικρότερη από αυτήν των αντιδρώντων, ενώ η κινητική ενέργεια των προϊόντων είναι μεγαλύτερη. Μια τέτοια αντίδραση ονομάζεται **εξώθερμη**.

Όταν το Q είναι αρνητικό, η μάζα των προϊόντων είναι μεγαλύτερη και η κινητική τους ενέργεια αντίστοιχα μικρότερη. Μια τέτοια αντίδραση ονομάζεται **ενδόθερμη**.

Πυρηνική σχάση

Μια πολύ σημαντική κατηγορία πυρηνικών αντιδράσεων είναι εκείνη στην οποία συμβαίνει απορρόφηση νετρονίων από βαρείς πυρήνες. Ένα είδος τέτοιων αντιδράσεων είναι η πυρηνική σχάση, κατά την οποία ένας βαρύς πυρήνας (π.χ. $^{235}_{92}U$) σχάζεται σε δύο μικρότερους πυρήνες. Σε μια τέτοια αντίδραση η ολική μάζα ηρεμίας των προϊόντων είναι μικρότερη από την αρχική μάζα ηρεμίας.

Η πρώτη πυρηνική σχάση παρατηρήθηκε το 1939 από τους Otto Hahn (Ότο Χαν) και Fritz Strassman (Φριτς Στράσμαν) μετά από βομβαρδισμό $^{235}_{92}U$ με νετρόνια. Υπάρχουν περίπου 90 διαφορετικοί συνδυασμοί των δύο θυγατρικών πυρήνων που αποτελούν τα θραύσματα του πυρήνα ουρανίου. Ένας από αυτούς, που αποτελεί συνηθισμένη διαδικασία σχάσης, είναι και ο εξής:

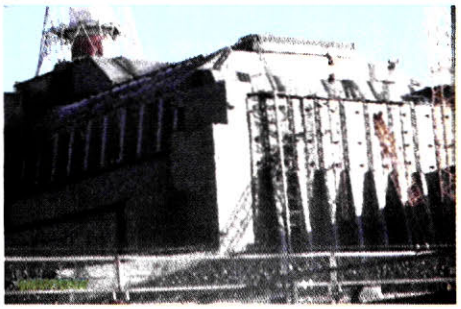
$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{141}_{56}Ba + ^{92}_{36}Kr + 3\,^{1}_{0}n$$

Η αντίδραση αυτή είναι ισχυρά εξώθερμη και τα θραύσματα της σχάσης, καθώς και τα νετρόνια, έχουν μια υψηλή κινητική ενέργεια της τάξης των 200MeV.

Μπορούμε να καταλάβουμε ποιοτικά το μηχανισμό της σχάσης, αν παρομοιάσουμε τον πυρήνα με μια σταγόνα σχεδόν σφαιρικού σχήματος. Καθώς ο πυρήνας συλλαμβάνει ένα νετρόνιο, με την πρόσθετη ενέργεια που παίρνει αρχίζει να ταλαντώνεται βίαια. Κατά τις ταλαντώσεις του αυτές παραμορφώνεται έντονα κατά τέτοιο τρόπο, ώστε στο μέσον του να σχηματίζεται ένα στένωμα (λαιμός), που χωρίζει δύο λοβούς. Η ηλεκτρική άπωση μεταξύ των δύο λοβών τούς ωθεί σε αποκόλληση. Οι δύο λοβοί αποχωρίζονται και αποτελούν τα θραύσματα της σχάσης (σχήμα 3-26).

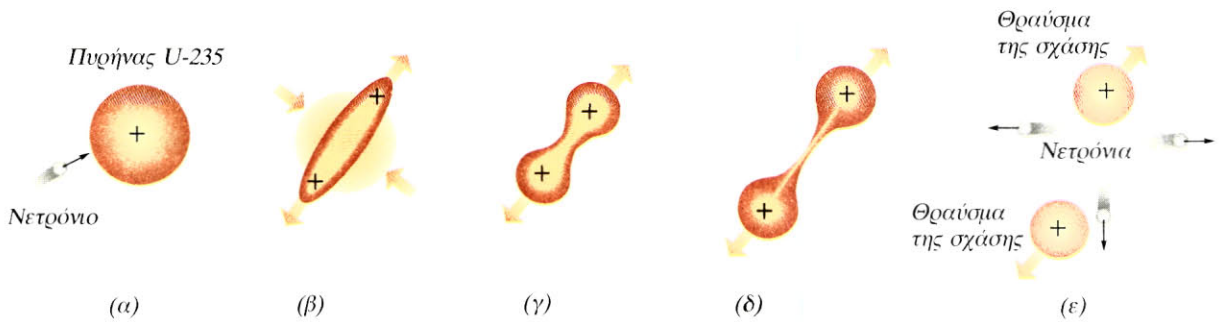
Τα νετρόνια που αποδεσμεύονται κατά τη σχάση ενός πυρήνα μπορούν στη συνέχεια να προκαλέσουν νέα σχάση σε άλλους πυρήνες και έτσι να έχουμε μια αλυσιδωτή αντίδραση. Αν η αλυσιδωτή αυτή αντίδραση δεν ελεγχθεί, δηλαδή δεν προχωρήσει αργά, τότε έχει ως αποτέλεσμα μια βίαιη έκρηξη και την απελευθέρωση ενός τεράστιου ποσού ενέργειας, ακόμη και από ένα γραμμάριο ουρανίου. Αυτή **η μη ελεγχόμενη σχάση αποτελεί την αρχή λειτουργίας της ατομικής βόμβας**.

Αντίθετα, σε έναν αντιδραστήρα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος επιβραδύνονται με κατάλληλο μηχανισμό τα παραγόμενα νετρόνια, ώστε να διατηρούν μια αυτοσυντηρούμενη αλυσιδωτή αντίδραση, η οποία όμως θα προχωρεί αργά και ελεγχόμενα, χωρίς να οδηγεί σε έκρηξη.

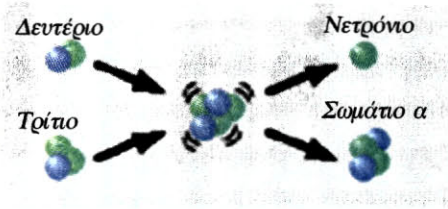


3-25 Ο τέταρτος αντιδραστήρας στο Τσέρνομπιλ μέσα στη σαρκοφάγο του από τσιμέντο. Στο Τσέρνομπιλ το 1986 είχαμε το μεγαλύτερο πυρηνικό ατύχημα στην ανθρώπινη ιστορία.

3-26 Τα στάδια σε μια πυρηνική σχάση όπως περιγράφονται από το μοντέλο της υγρής σταγόνας για τον πυρήνα.



Πυρηνική σύντηξη



3-27 Η σύντηξη δευτερίου και τριτίου σχηματίζει πυρήνα He και ένα νετρόνιο.

Στην ενότητα 3.1 είδαμε ότι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο των ελαφρών πυρήνων είναι μικρότερη από την ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο των βαρύτερων. Η διαδικασία της συνένωσης δύο ελαφρών πυρήνων, για να σχηματίσουν ένα βαρύτερο, λέγεται **πυρηνική σύντηξη**.

Επειδή η μάζα ηρεμίας του τελικού πυρήνα είναι μικρότερη από το άθροισμα των μαζών των αρχικών πυρήνων, υπάρχει μια απώλεια μάζας, η οποία συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση της ενέργειας της τελικής κατάστασης. Τρία τέτοια παραδείγματα σύντηξης είναι τα παρακάτω:

$$^{1}_{1}H + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{2}_{1}H + e^{+} + \nu_e$$

$$^{1}_{1}H + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{3}_{2}He + \gamma$$

$$^{1}_{1}H + ^{3}_{2}He \rightarrow ^{4}_{2}He + e^{+} + \nu_e$$

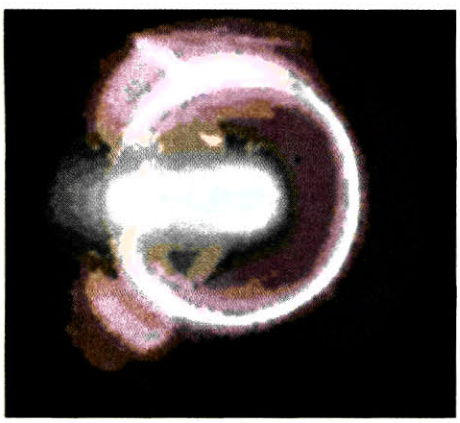
Αυτή η σειρά των αντιδράσεων, που λέγεται κύκλος πρωτονίου - πρωτονίου, πιστεύεται ότι συμβαίνει στο εσωτερικό του Ήλιου αλλά και άλλων αστεριών, όπου αφθονεί το υδρογόνο, και από αυτήν προέρχεται η ενέργεια των άστρων.

Τα ποζιτρόνια που παράγονται στις αντιδράσεις αυτές συγκρούονται στο εσωτερικό του Ήλιου με ηλεκτρόνια, τα ζεύγη αυτά εξαϋλώνονται και η ενέργειά τους μετατρέπεται σε ακτινοβολία γ.

Επομένως ολόκληρος ο κύκλος και των τριών αντιδράσεων ισοδυναμεί τελικά με μία αντίδραση, όπου $4\,^{1}_{1}H$ συντήκονται και δημιουργούν έναν πυρήνα $^{4}_{2}He$, ενώ ταυτόχρονα εκπέμπεται ακτινοβολία γ και νετρίνα.

Βλέπουμε ότι η ενέργεια του Ήλιου προέρχεται από το «πυρηνικό καύσιμο» υδρογόνο, καθώς αυτό μετατρέπεται βαθμιαία σε ήλιο. Αν υποτεθεί ότι η παραγωγή ενέργειας στον Ήλιο, καθώς και η ακτινοβολία του, θα συνεχιστούν με τους ίδιους ρυθμούς, εκτιμάται ότι ο Ήλιος διαθέτει αρκετά καύσιμα στον πυρήνα του για να διατηρήσει την υπάρχουσα λαμπρότητά του για 5-9 δισεκατομμύρια χρόνια περίπου.

Για να συμβεί σύντηξη μεταξύ δύο πυρήνων, πρέπει να προσεγγίσουν αρκετά μεταξύ τους, ώστε να υπερνικηθεί η ηλεκτρική άπωση και να επικρατήσει η ισχυρή πυρηνική δύναμη. Για να συμβεί αυτό, πρέπει οι πυρήνες να αποκτήσουν πολύ υψηλή κινητική ενέργεια της τάξης των 0,7MeV. Τόσο μεγάλη όμως κινητική ενέργεια μόνο σε εξαιρετικά υψηλή θερμοκρασία μπορεί να αποκτηθεί από έναν πυρήνα.



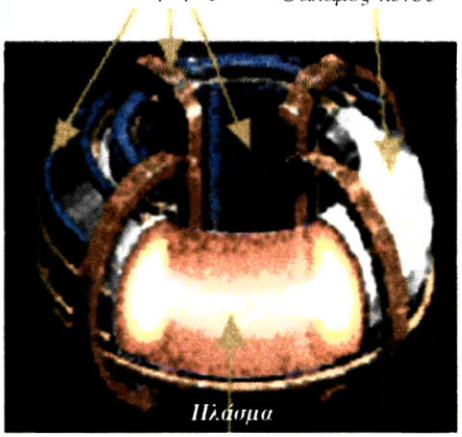
3-28 Στην προσπάθεια να επιτευχθεί ελεγχόμενη σύντηξη δοκιμάζεται η μέθοδος συγκράτησης του πλάσματος με μαγνητικό πεδίο.

Η θερμοκρασία, για να προκληθεί αντίδραση σύντηξης, είναι της τάξης των 10^8K. Στις θερμοκρασίες αυτές τα άτομα έχουν πια ιονισθεί τελείως, δηλαδή έχουν χάσει τα ηλεκτρόνιά τους, και η ιονισμένη αυτή κατάσταση, όπου έχουμε μόνο ηλεκτρόνια και πυρήνες, λέγεται **πλάσμα**.

Τέτοιες θερμοκρασίες συναντάμε στη φύση μόνο στα άστρα. Οι υψηλές αυτές θερμοκρασίες δικαιολογούν την ονομασία **θερμοπυρηνικές αντιδράσεις** με την οποία χαρακτηρίζονται συχνά οι αντιδράσεις σύντηξης.

Σε πολλά εργαστήρια στον κόσμο καταβάλλεται έντονη προσπάθεια κατασκευής θερμοπυρηνικού αντιδραστήρα, όπου θα γίνεται ελεγχόμενη πυρηνική σύντηξη. Δυστυχώς τόσο υψηλές θερμοκρασίες είναι εξαιρετικά δύσκολο να επιτευχθούν και να συντηρηθούν για αρκετό χρονικό διάστημα, ώστε να έχουμε πρακτικά αξιοποιήσιμη παραγωγή ενέργειας.

Αν πάντως επιτευχθεί αξιοποιήσιμη ελεγχόμενη πυρηνική σύντηξη, το ενεργειακό κέρδος για τον άνθρωπο θα είναι σημαντικό, αφού το «πυρηνικό καύσιμο» που προτείνεται είναι το δευτέριο, που υπάρχει άφθονο και φθηνό στο νερό των θαλασσών.



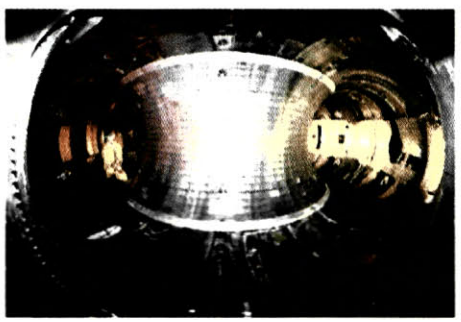
3-29 Σε έναν ερευνητικό αντιδραστήρα ΤΟΚΑΜΑΚ το ρεύμα που θερμαίνει το πλάσμα είναι αρκετά εκατομμύρια ampere και η θερμοκρασία μεγαλύτερη από 10^8K.

Το πρόβλημα των πυρηνικών αποβλήτων

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα, που συνοδεύουν τη λειτουργία των πυρηνικών αντιδραστήρων, είναι αυτό της διαχείρισης των αποβλήτων τους. Τα απόβλητα του αντιδραστήρα είναι τα ραδιενεργά υλικά που εμφανίζονται ως προϊόντα των αντιδράσεων, καθώς και τα μέταλλα της «καρδιάς» του αντιδραστήρα, όταν αυτή πρέπει να αντικατασταθεί. Αυτά τα υψηλής ραδιενέργειας υλικά περιέχουν ισότοπα με μεγάλους χρόνους υποδιπλασιασμού και πρέπει να αποθηκευτούν για πολύ μεγάλη χρονική διάρκεια, ώστε να μην προκαλέσουν περιβαλλοντική μόλυνση.

Επί του παρόντος η λύση στο πρόβλημα αυτό είναι να τα τοποθετούμε σε καλά σφραγισμένα κιβώτια και να τα θάβουμε βαθιά σε ορυχεία.

Πάντως πρέπει να αναφερθεί ότι ένα ακόμη πλεονέκτημα των αντιδραστήρων σύντηξης, σε σχέση με τους αντιδραστήρες σχάσης, είναι τα λίγα ραδιενεργά κατάλοιπα που αφήνουν.



3-30 Τα ΤΟΚΑΜΑΚ αποτελούν την πιο επιτυχημένη προσπάθεια κατασκευής αντιδραστήρων σύντηξης.

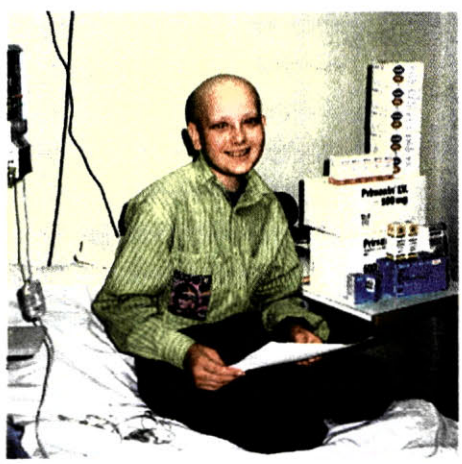
3.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΤΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Α. Βλάβες από ακτινοβολία

Όταν η ύλη απορροφά ακτινοβολία, μπορεί να υποστεί σοβαρές βλάβες. Το είδος και ο βαθμός των ζημιών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, μεταξύ των οποίων είναι το είδος και η ενέργεια της ακτινοβολίας, καθώς και οι ιδιότητες του υλικού που την απορροφά. Για παράδειγμα, μέταλλα που χρησιμοποιούνται στους πυρηνικούς αντιδραστήρες εξασθενούν πολύ με το βομβαρδισμό τους από νετρόνια υψηλής ενέργειας. Η ζημιά εδώ οφείλεται σε μετακινήσεις των ατόμων μέσα στο μέταλλο, οι οποίες έχουν ως συνέπεια την αλλαγή των μηχανικών ιδιοτήτων του μετάλλου.

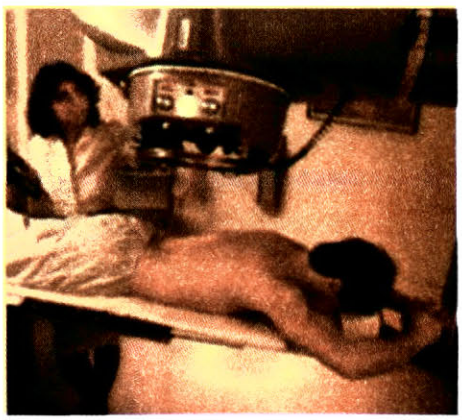
Οι βλάβες από πυρηνικές ακτινοβολίες στους βιολογικούς οργανισμούς οφείλονται κυρίως στον ιονισμό που προκαλούν αυτές οι ακτινοβολίες σε ουσίες που βρίσκονται μέσα στα κύτταρα.

Στον όρο «ακτινοβολίες» περιλαμβάνονται: οι ραδιενεργές α, β, γ, τα νετρόνια, καθώς και η υψηλής ενέργειας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, όπως π.χ. οι ακτίνες Χ. Στο σχηματισμό ιόντων οφείλεται και το όνομά τους ως **ιονίζουσες ακτινοβολίες**.



3-31 Άτομο που έχει εκτεθεί σε ακτινοβολίες έχει χάσει τα μαλλιά του.

3-32 Οι τρεις παραπάνω εικόνες δείχνουν τις παραμορφωτικές βλάβες σε απογόνους ατόμων που δέχτηκαν πυρηνικές ακτινοβολίες μετά το πυρηνικό ατύχημα του Τσέρνομπιλ.



3-33 Ακτινοβολία γ χρησιμοποιείται για καταστροφή καρκινικών κυττάρων. Υψηλή δόση εστιάζεται σε μικρή περιοχή με τη βοήθεια σκόπευσης με laser.

Η λειτουργία των κυττάρων μπορεί να διαταραχθεί σοβαρά, όταν σχηματισθούν μέσα στο κύτταρο δραστικά ιόντα ή ρίζες ως αποτέλεσμα της ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, σχηματισμός ιόντων υδροξυλίου και υδρογόνου μπορεί να προκαλέσει χημικές αντιδράσεις διάσπασης δεσμών σε πρωτεΐνες και να επιφέρει αλλαγές στο γενετικό υλικό των κυττάρων (DNA). Μεγάλες ποσότητες ακτινοβολίας καταστρέφουν μεγάλο αριθμό μορίων σε ένα κύτταρο και προκαλούν το θάνατό του. Αν και ο θάνατος ενός κυττάρου δεν αποτελεί συνήθως πρόβλημα, ο θάνατος πολλών κυττάρων μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μια μη αντιστρεπτή βλάβη του οργανισμού.

Είναι πιθανόν επίσης κύτταρα που θα επιζήσουν από την ακτινοβολία να έχουν υποστεί βλάβες και κατά τον πολλαπλασιασμό τους να δημιουργήσουν νέα μεταλλαγμένα κύτταρα που πολύ συχνά οδηγούν στην εμφάνιση καρκίνου.

Βλάβες από ακτινοβολία μπορεί να προκληθούν επίσης και στο γενετικό υλικό των γενετικών κυττάρων. Στην περίπτωση αυτή οι αλλαγές των γονιδίων οδηγούν σε μεταβολές διάφορων χαρακτηριστικών των απογόνων του οργανισμού.

Ως **απορροφηθείσα δόση ακτινοβολίας** ορίζεται η ενέργεια που έχει αποτεθεί στους ιστούς ανά χιλιόγραμμο μάζας. Μια συνηθισμένη μονάδα μέτρησής της είναι το 1rad, το οποίο ορίζεται ως η ποσότητα ακτινοβολίας που αποθέτει 0,01J ενέργειας ανά χιλιόγραμμο μάζας του ιστού (1rad = 0,01J/kg). Στο σύστημα S.I. μονάδα είναι το 1Gray (1Gy=1J/kg).

Η απορροφηθείσα δόση δεν αποτελεί μόνη της μέτρο των βιολογικών επιπτώσεων και αυτό διότι τα βιολογικά αποτελέσματα δεν εξαρτώνται μόνο από τη δόση αλλά και από το είδος της ακτινοβολίας. Έτσι, για παράδειγμα, μια δεδομένη δόση ακτινοβολίας α προκαλεί δέκα φορές περισσότερες βιολογικές βλάβες από ίση δόση ακτίνων Χ.

Για να είναι οι δόσεις συγκρίσιμες ως προς τα βιολογικά τους αποτελέσματα, χρησιμοποιείται το μέγεθος **ισοδύναμη δόση** με μονάδα μέτρησης το 1rem και κυρίως το υποπολλαπλάσιό του 1millirem. Παραθέτουμε μερικούς αριθμούς για σύγκριση.

Μία ακτινογραφία θώρακα αποθέτει γύρω στα 20-40mrem. Ισοδύναμη δόση 500rem σε μικρό χρονικό διάστημα σε ολόκληρο το σώμα συνήθως οδηγεί στο θάνατο μέσα σε λίγες ημέρες. Εντοπισμένη δόση 10000rem προκαλεί πλήρη καταστροφή του ιστού. Η κοσμική ακτινοβολία και η φυσική ραδιενέργεια του εδάφους αντιστοιχούν σε ισοδύναμη δόση 0,1rem ανά έτος στην επιφάνεια της θάλασσας. Η τιμή αυτή αυξάνεται με το ύψος.

Β. Χρήσεις της ακτινοβολίας

Ραδιενεργά σωματίδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως **ιχνηθέτες** χημικών στοιχείων σε διάφορες αντιδράσεις. Στη Βιολογία το ραδιενεργό ισότοπο ^{15}O, όταν εισαχθεί κατάλληλα στο ριζικό σύστημα του φυτού, κυκλοφορεί στη συνέχεια μέσα σ' αυτό και μπορούμε, μετρώντας τη ραδιενέργεια στα διάφορα μέρη του, να βγά-

λουμε συμπεράσματα για την πορεία του μεταβολισμού, δηλαδή του συνόλου των αντιδράσεων που γίνονται σε έναν οργανισμό (σχήμα 3-34).

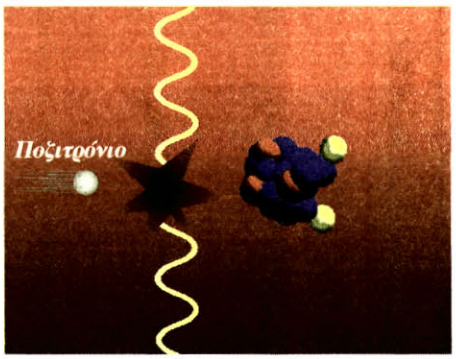
3-34 *Η χρήση ραδιοϊσότοπων ως ιχνηθετών.*

Η χρήση του ραδιενεργού ιωδίου για τη μελέτη της λειτουργίας του θυρεοειδούς αδένα είναι επίσης μια γνωστή εφαρμογή. Σχεδόν όλη η διακίνηση του ιωδίου στον οργανισμό μας, που προσλαμβάνεται από το αλάτι και από τις θαλάσσιες τροφές, γίνεται μέσω του θυρεοειδούς. Εισάγεται λοιπόν στον οργανισμό μια μικρή ποσότητα ραδιενεργού ιωδίου (^{131}I) υπό μορφή διαλύματος NaI. Μερικές ώρες αργότερα μετριέται με κατάλληλες συσκευές η ακτινοβολία του ^{131}I και συνεπώς η συγκέντρωσή του σε διάφορα όργανα του σώματος.

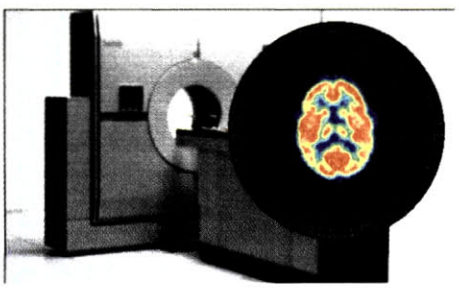
Οι ακτινοβολίες χρησιμοποιούνται επίσης στην Ιατρική για επιλεκτική καταστροφή ιστών, όπως είναι οι όγκοι. Ως πηγές χρησιμοποιούνται τεχνητά παραγόμενα ισότοπα. Ένα από τα πιο συνηθισμένα είναι το ^{60}Co.

Μια μέθοδος ιατρικής απεικόνισης, κυρίως του εγκεφάλου, είναι η τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων (**PET**). Με αυτή χορηγούνται στον ασθενή ισότοπα στοιχείων, όπως άνθρακα, οξυγόνου κτλ., που εκπέμπουν ποζιτρόνια με διάσπαση β. Όταν ένα ποζιτρόνιο εξαϋλώνεται μετά από σύγκρουση με ηλεκτρόνιο, εκπέμπονται δύο φωτόνια γ, που ανιχνεύονται από κυκλική διάταξη ανιχνευτών γύρω από το κεφάλι του ασθενούς. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια υπολογιστή, σχηματίζεται μια εικόνα εγκάρσιας τομής του εγκεφάλου (σχήματα 3-35, 3-36).

Ακτινοβολίες χρησιμοποιούνται επίσης για την αποστείρωση και τη συντήρηση μερικών κατηγοριών τροφίμων, αφού με τον τρόπο αυτό καταστρέφονται οι παθογόνοι μικροοργανισμοί.



3-35 *Ένα ποζιτρόνιο, που εκπέμπεται από το ισότοπο που έχει χορηγηθεί στον ασθενή, συγκρούεται με κάποιο ηλεκτρόνιο ατόμου και δημιουργούνται δύο φωτόνια, τα οποία καταγράφει η συσκευή PET.*



3-36 *Συσκευή τομογραφίας με εκπομπή ποζιτρονίου. Η εικόνα παριστάνει τομή εγκεφάλου σχηματισμένη από υπολογιστή, ο οποίος επεξεργάζεται τα δεδομένα της συσκευής.*

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

Ο σκοπός της δραστηριότητας αυτής είναι να δείξει ότι ο εκθετικός νόμος που συναντάμε στις ραδιενεργές διασπάσεις δεν είναι κάποιος φυσικός νόμος των πυρήνων, αλλά ένας στατιστικός νόμος. Στο νόμο αυτό υπακούουν όλα τα φαινόμενα, στα οποία το να συμβεί ένα γεγονός, ανάμεσα σε μια σειρά πιθανών ενδεχομένων, έχει μια συγκεκριμένη πιθανότητα.

ΠΕΙΡΑΜΑ

1. Αγοράστε από το περίπτερο δύο κουτιά από τα μικρά σοκολατάκια M & M's. Βάλτε τα όλα μαζί σε ένα κουτί, ανακινήστε το, ώστε να ανακατευτούν καλά, και αδειάστε το περιεχόμενο σε ένα τραπέζι. Μετρήστε το συνολικό αριθμό των M & M's. Γράψτε τον αριθμό αυτό στο πρώτο κουτάκι της δεύτερης σειράς του πίνακα που φαίνεται παρακάτω.

Αριθμ. μέτρησης	1	2	3	4	5	6	7
M & M's που απέμειναν							

Απομακρύνετε εκείνα τα σοκολατάκια πού έχουν στην επάνω όψη τους το M. Μια καλή ιδέα θα ήταν να τα φάτε! Μετρήστε το συνολικό αριθμό που απέμεινε τώρα στο τραπέζι και σημειώστε στο κουτάκι της μέτρησης υπ' αριθμ. 2.

Επαναλάβετε τη διαδικασία αυτή 7 συνολικά φορές. Αν ο αριθμός των M & M's που απομένει γίνει 0 σε κάποια δοκιμή, το πείραμα σταματάει και το 0 δε θα το περιλάβετε στις μετρήσεις σας.

2. Χαράξτε τη γραφική παράσταση, όπου στον άξονα x θα βάλετε τον αντίστοιχο αύξοντα αριθμό της μέτρησης και στον άξονα y τα σοκολατάκια που απέμεναν κάθε φορά. Παρατηρήστε την εκθετική μορφή της συνάρτησης.

3. Δοκιμάστε να χαράξετε στους ίδιους άξονες την εκθετική καμπύλη

$$N = N_0 e^{-0,5x}$$

όπου N_0 ο αρχικός αριθμός των M & M's. Συγκρίνετε τις δύο καμπύλες.

Σημείωση: Ο εκθέτης 0,5 είναι η πιθανότητα να εμφανιστεί το M στην επάνω όψη από κάθε σοκολατάκι σε κάθε ρίψη. Αντιστοιχεί στη σταθερά λ των πυρήνων, η οποία εκφράζει την πιθανότητα διάσπασής τους ανά μονάδα χρόνου. Εδώ εκφράζει την πιθανότητα απόσυρσης του σοκολατιού ανά ανακίνηση του κουτιού.

ΣΥΝΟΨΗ 3ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Ο πυρήνας του ατόμου αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια. Βρίσκεται στο κέντρο του ατόμου και έχει ακτίνα μερικές δεκάδες χιλιάδες φορές μικρότερη από την ακτίνα του ατόμου.

- Η ταυτότητα ενός πυρήνα είναι ο ατομικός του αριθμός Z και ο μαζικός του αριθμός A. Πυρήνες με ίδιους ατομικούς αριθμούς αλλά διαφορετικούς μαζικούς, λέγονται ισότοποι.

- Η μάζα ενός πυρήνα είναι πάντα μικρότερη από το άθροισμα των μαζών των ελεύθερων νουκλεονίων που τον αποτελούν. Η διαφορά αυτή των μαζών ονομάζεται έλλειμμα μάζας. Δηλαδή ισχύει:

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_\Pi$$

- Η ισοδύναμη ενέργεια E_B που αντιστοιχεί στο έλλειμμα μάζας ονομάζεται ενέργεια σύνδεσης του πυρήνα. Δηλαδή ισχύει:

$$E_B = (\Delta M)c^2$$

- Όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο σε έναν πυρήνα τόσο σταθερότερος είναι ο πυρήνας αυτός.

- Η δύναμη που συγκρατεί τα νουκλεόνια στον πυρήνα είναι η ισχυρή πυρηνική δύναμη, που δρα μόνο σε πολύ κοντινές αποστάσεις μεταξύ των γειτονικών νουκλεονίων.

- Η ενέργεια του πυρήνα είναι κβαντωμένο μέγεθος. Ο πυρήνας έχει διακριτές ενεργειακές στάθμες.

- Σε κάθε σωμάτιο αντιστοιχεί το αντισωμάτιό του. Όταν αυτά συνενωθούν, εξαϋλώνονται και μετατρέπονται σε φωτόνια ή δημιουργούνται άλλα σωμάτια.

- Τα νουκλεόνια αποτελούνται από quarks up και down, που φέρουν ως φορτία κλάσματα του στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου. Τα quarks δεν εμφανίζονται ελεύθερα.

- Τα λεπτόνια είναι 6 σωματίδια που δεν εκδηλώνουν ισχυρές αλληλεπιδράσεις. Στην ομάδα αυτή ανήκουν το ηλεκτρόνιο και το νετρίνο.

- Οι θεμελιώδεις δυνάμεις είναι: η ισχυρή, η ηλεκτρομαγνητική, η ασθενής και η βαρυτική. Οι αλληλεπιδράσεις σε θεμελιώδες επίπεδο ερμηνεύονται με ανταλλαγή σωματιδίων που είναι φορείς των δυνάμεων.

- Οι πιο πολλοί πυρήνες είναι ασταθείς και μεταπίπτουν σε σταθερούς πυρήνες με διασπάσεις α, β και γ. Το φαινόμενο ονομάζεται ραδιενέργεια.

- Στην πυρηνική σχάση ένας βαρύς πυρήνας με απορρόφηση νετρονίων χωρίζεται σε δύο μεγάλα θραύσματα και ελευθερώνονται νέα νετρόνια. Η σχάση είναι αντίδραση εξώθερμη.

- Στην πυρηνική σύντηξη δύο ελαφροί πυρήνες συνενώνονται, για να σχηματίσουν ένα βαρύτερο. Η αντίδραση αυτή είναι εξώθερμη.

- Οι πυρηνικές ακτινοβολίες προκαλούν βλάβες, αλλά βρίσκουν και πολλές χρήσεις στην Ιατρική, στη βιομηχανία, στη Γεωπονία κτλ.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Τι ονομάζουμε ισότοπους πυρήνες; Σε τι μοιάζουν τα ισότοπα ενός στοιχείου Χ;

2. Δίνονται οι πυρήνες:

α) $^{12}_{6}C$, β) $^{14}_{6}C$, γ) $^{13}_{6}C$, δ) $^{14}_{7}N$, ε) $^{16}_{8}O$, ζ) $^{17}_{8}O$

i. Ποιοι από τους παραπάνω πυρήνες περιέχουν τον ίδιο αριθμό:

πρωτονίων, νετρονίων, νουκλεονίων;

ii. Ποιοι περιστοιχίζονται από τον ίδιο αριθμό ηλεκτρονίων στο ουδέτερο άτομο;

iii. Ποιοι είναι ισότοπα του ίδιου στοιχείου;

3. Τι ονομάζουμε ενέργεια σύνδεσης ενός πυρήνα;

4. Ο πυρήνας Χ έχει ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο 8,8MeV, ενώ ο πυρήνας Υ έχει ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο 7,6MeV. Ποιος από τους δύο είναι πιο σταθερός;

5. Συμπληρώστε τα κενά στο παρακάτω κείμενο:
Η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές για πυρήνες ..... μαζικών αριθμών. Όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο ενός πυρήνα τόσο ..... είναι ο πυρήνας.
Ένας πυρήνας με μεγάλο μαζικό αριθμό έχει ..... ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο από έναν πυρήνα μεσαίου μαζικού αριθμού και μπορεί να ..... σε δύο μεσαίους πυρήνες ..... ενέργεια υπό μορφή .... των θραυσμάτων.

6. Στο πείραμα του Rutherford υποθέστε ότι ένα σωμάτιο α μικρής κινητικής ενέργειας κατευθύνεται μετωπικά προς τον πυρήνα ενός ατόμου. Γιατί το σωμάτιο δεν έρχεται σε επαφή με τον πυρήνα;

7. Πώς εξηγείται το ότι ένας πυρήνας δε διασπάται, αν και τα πρωτόνιά του απωθούνται μεταξύ τους;

8. Ποιες είναι οι σημαντικότερες ιδιότητες της ισχυρής πυρηνικής δύναμης;

9. Να αντιστοιχίσετε τις διάφορες αλληλεπιδράσεις με τα σωματίδια φορείς τους:

α. Ασχυρή	Α. φωτόνιο
β. Ασθενής	Β. βαρυτόνιο
γ. Βαρυτική	Γ. W^+, W^-, Z^0
δ. Ηλεκτρομαγνητική	Δ. γκλουόνιο

10. Το περιεχόμενο σε quarks του νετρονίου είναι udd. Ποιο είναι το περιεχόμενο σε quarks του αντινετρονίου; Το νετρόνιο και το αντινετρόνιο ταυτίζονται;

11. Ποια στοιχειώδη σωματίδια υπάρχουν στην ύλη που παρατηρούμε σήμερα στο Σύμπαν;

12. Χαρακτηρίστε καθεμιά από τις παρακάτω προτάσεις ως σωστή ή λανθασμένη:

α. Ένα ποζιτρόνιο και ένα ηλεκτρόνιο εξαϋλώνονται και στη θέση τους παράγεται ένα φωτόνιο.

β. Ένα λεπτόνιο (μ) αλληλεπιδρά με ένα πρωτόνιο με ισχυρή αλληλεπίδραση ανταλλάσσοντας ένα γκλουόνιο.

γ. Τα λεπτόνια είναι συνολικά έξι, εκ των οποίων τα τρία μόνο έχουν ηλεκτρικό φορτίο.

δ. Ένα αδρόνιο αποτελείται από τα παρακάτω quarks: (u, d).

ε. Σε κάθε στοιχειώδες σωματίδιο αντιστοιχεί και ένα αντισωματίδιο.

13. Ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο με αμελητέες κινητικές ενέργειες εξαϋλώνονται και σχηματίζονται δύο φωτόνια. Πόση ενέργεια έχουν συνολικά τα δύο φωτόνια;

14. Συμπληρώστε τα κενά στο παρακάτω κείμενο:
Τα νουκλεόνια δομούνται από .....
Τα λεπτόνια είναι μια ξεχωριστή κατηγορία στοιχειωδών σωματιδίων, που δε συμμετέχουν σε ..... αλληλεπιδράσεις. Τα ..... είναι οι φορείς των ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων. Δύο quarks αλληλεπιδρούν ισχυρά ανταλλάσσοντας ένα .....

15. Τι είναι η μεταστοιχείωση;

16. Ποιο φαινόμενο ονομάζεται ραδιενέργεια; Ποια είδη ραδιενεργών ακτινοβολιών υπάρχουν;

17. Τι ονομάζουμε χρόνο υποδιπλασιασμού ενός ραδιενεργού πυρήνα;

18. Γιατί, όσο αυξάνεται ο ατομικός αριθμός των πυρήνων, χρειάζεται να υπάρχουν όλο και περισσότερα νετρόνια, για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα των πυρήνων;

19. Ένα φιλμ που βρίσκεται μέσα σε ένα κουτάκι από παχύ χαρτόνι κινδυνεύει να προσβληθεί από παρακείμενες πηγές:

i. ακτίνων α, ii. ακτίνων γ , iii. ακτίνων β

20. Υποθέστε ότι μία δέσμη περιέχει σωματίδια α, β και γ, τα οποία θέλουμε να διαχωρίσουμε. Υποδείξετε κατάλληλο πειραματικό τρόπο.

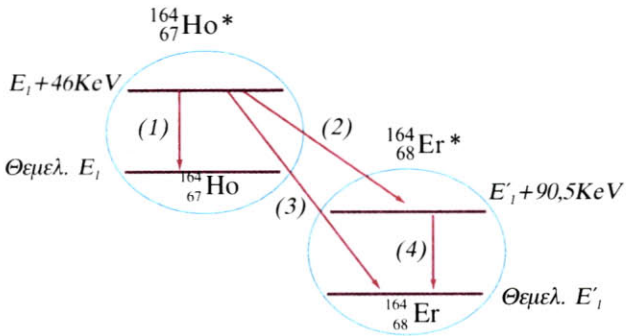
21. Ποιος πυρήνας θα προέλθει από τη διάσπαση- β^- ενός πυρήνα $^{14}_{6}C$;

22. Το παρακάτω σχήμα δείχνει διαφορετικές διασπάσεις μιας αρχικά διεγερμένης κατάστασης του πυρήνα $^{164}_{67}Ho$, η οποία διασπάται κατά διάφορους τρόπους:

α. Χαρακτηρίστε καθεμιά από αυτές ως διάσπαση α, διάσπαση β και διάσπαση γ.

β. Για όποιες από αυτές είναι διασπάσεις γ υπολογίστε τις αντίστοιχες ενέργειες των φωτονίων που παράγονται.

γ. Για όποιες από αυτές είναι διασπάσεις β συμπληρώστε τις αντίστοιχες αντιδράσεις.



23. Ποιες πυρηνικές αντιδράσεις ονομάζουμε σχάσεις και ποιες συντήξεις;

24. Σε τι διαφέρει ο μηχανισμός σχάσης που γίνεται σε έναν αντιδραστήρα από το μηχανισμό σχάσης σε μια πυρηνική βόμβα;

25. Σε οποιαδήποτε πυρηνική αντίδραση ισχύουν οι παρακάτω ιδιότητες:

α. Το άθροισμα των ατομικών αριθμών στο πρώτο και στο δεύτερο μέλος της αντίδρασης είναι ίσο.

β. Το άθροισμα των μαζικών αριθμών στο πρώτο και στο δεύτερο μέλος της αντίδρασης είναι ίσο.

Εξηγήστε ποιοι βασικοί νόμοι διατήρησης δικαιολογούν τις ιδιότητες αυτές.

26. Ποιες από τις παρακάτω αντιδράσεις είναι πυρηνικές συντήξεις και ποιες πυρηνικές σχάσεις;

$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{94}_{38}Sr + ^{140}_{54}Xe + 2^{1}_{0}n$$

$$^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{3}_{1}H + ^{1}_{1}H$$

$$^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n$$

$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{88}_{38}Sr + ^{136}_{54}Xe + 12^{1}_{0}n$$

27. Να αντιστοιχίσετε τα στοιχεία της αριστερής στήλης με αυτά της δεξιάς.

Α. Αριθμός νετρονίων ατόμου.	α.	A
Β. Αριθμός νουκλεονίων ατόμου.	β.	N
Γ. Αριθμός πρωτονίων ατόμου.	γ.	Z
Δ. Αριθμός ηλεκτρονίων στο ιονισμένο άτομο.		

28. Να χαρακτηρίσετε ως σωστή (Σ) ή λανθασμένη (Λ) την παρακάτω πρόταση:

Σε πολύ μικρές αλλά όχι αμελητέες αποστάσεις (π.χ. $d=10^{-5}m$) οι ηλεκτρικές δυνάμεις είναι πολύ ισχυρές ενώ οι πυρηνικές αμελητέες.

29. Με τα σύμβολα m_1, m_2, m_3 και m_4 συμβολίζουμε αντίστοιχα: τη μάζα ενός πυρήνα Α που υφίσταται αυθόρμητη σχάση, το άθροισμα των μαζών των πυρήνων που παράγονται από τη σχάση του Α, το άθροισμα των μαζών δύο άλλων πυρήνων που συντήκονται, και τέλος τη μάζα του πυρήνα που παράγεται από τη σύντηξη των προηγουμένων. Ποια από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστή;

α. $m_1 > m_2$ και $m_3 > m_4$

β. $m_1 = m_2$ και $m_3 = m_4$

γ. $m_1 < m_2$ και $m_3 < m_4$

δ. $m_1 > m_2$ και $m_3 < m_4$

30. Δίνεται ότι η ισοδύναμη ενέργεια της μάζας ηρεμίας ενός ηλεκτρονίου ή ενός ποζιτρονίου είναι 0,51MeV. Ποια από τις παρακάτω ενέργειες ενός φωτονίου είναι ικανή να δώσει ένα ζεύγος ηλεκτρονίου - ποζιτρονίου.

α. 0,51 MeV, β. 1,02 MeV γ. 0,12MeV δ. 1MeV

ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Για τα προβλήματα να θεωρηθούν γνωστά τα παρακάτω φυσικά μεγέθη:

$|q_e|=|q_p|=1{,}6\times10^{-19}$C , $m_p=1{,}6726\times10^{-27}kg=1{,}007277$u , $m_n=1{,}6750\times10^{-27}kg=1{,}008665$u
$m_e=9{,}109\times10^{-31}kg=5{,}486\times10^{-4}$u .

Μάζες των ουδέτερων ατόμων: ${}^{1}_{1}H=1{,}00783$u, ${}^{7}_{3}Li=7{,}01600$u , ${}^{4}_{2}He=4{,}00260$u, ${}^{56}_{26}Fe=55{,}934939$u,
${}^{230}_{90}Th=230{,}033128$u, ${}^{226}_{88}Ra=226{,}025403$u, $1u=1{,}66055\times10^{-27}$kg, $1u=931{,}5$MeV.

Αριθμός Avogadro$=6{,}023\times10^{23}$ πυρήνες/mole πυρήνων, $1\text{MeV}=4{,}45\times10^{-20}$KWh και $c=3\times10^{8}$m/s.

1. Χρησιμοποιήστε ενεργειακές μεθόδους, για να υπολογίσετε την ελάχιστη απόσταση που μπορεί να πλησιάσει ένα σωμάτιο α το οποίο βάλλεται μετωπικά από πολύ μακριά, με αρχική ενέργεια 0,5MeV, εναντίον ενός ακίνητου πυρήνα ${}^{197}_{79}Au$. Υποθέστε ότι ο πυρήνας παραμένει σε ηρεμία κατά την κρούση. Πόση θα ήταν η απόσταση αυτή, αν η ενέργεια του σωματίου ήταν 3,5MeV;

2. Υπολογίστε την ενέργεια σύνδεσης και την ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο για τον πυρήνα ${}^{56}_{26}Fe$.

3. Ο χρόνος υποδιπλασιασμού του ${}^{131}I$ είναι 8,04 ημέρες. Υπολογίστε τη σταθερά διάσπασης του ισότοπου αυτού. Βρείτε επίσης τον αριθμό των πυρήνων ${}^{131}I$ που περιέχονται σε ένα δείγμα ενεργότητας $1{,}85\times10^{4}$ Bq.

4. Ένα δείγμα κάποιου ραδιοϊσότοπου, μόλις παρασκευαστεί, έχει ενεργότητα 37×10^{7} Bq. Μετά από 4 ώρες η ενεργότητα του δείγματος έγινε $29{,}6\times10^{7}$ Bq. Βρείτε τη σταθερά διάσπασης και το χρόνο υποδιπλασιασμού του ισότοπου.
Ποια θα είναι η ενεργότητα του δείγματος 30 ώρες μετά την παρασκευή του;

5. Υπολογίστε την κινητική ενέργεια ενός σωματίου α που εκπέμπεται από ένα ακίνητο πυρήνα ${}^{230}_{90}Th$. Αγνοήστε την κινητική ενέργεια του θυγατρικού πυρήνα ${}^{226}_{88}Ra$.

6. Να συμπληρώσετε τις παρακάτω πυρηνικές αντιδράσεις:

$$X + {}^{14}_{7}N \rightarrow {}^{1}_{1}H + {}^{17}_{8}O$$

$${}^{7}_{3}Li + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + X$$

$${}^{27}_{13}Al + {}^{4}_{2}He \rightarrow X + {}^{30}_{15}P$$

$${}^{1}_{0}n + X \rightarrow {}^{7}_{3}Li + {}^{4}_{2}He$$

7. Η πρώτη πυρηνική αντίδραση στην οποία χρησιμοποιήθηκαν σωματίδια προερχόμενα από επιταχυντή πραγματοποιήθηκε από τους Cockroft και Walton και ήταν η παρακάτω:

$${}^{7}_{3}Li + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{4}_{2}He$$

Υπολογίστε την τιμή της ενέργειας Q αυτής της αντίδρασης. Είναι ενδόθερμη ή εξώθερμη;

8. Υπολογίστε την ενέργεια που αποδεσμεύεται, όταν 1kg ${}^{235}U$ παθαίνει σχάση. Λάβετε υπόψη ότι η ενέργεια που αποδεσμεύεται ανά πυρήνα που διασπάται είναι 208MeV.

9. Το έλλειμμα μάζας ενός πυρήνα με 7 πρωτόνια και 7 νετρόνια είναι 0,11543u. Πόση είναι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο αυτού του πυρήνα;

10. Το έλλειμμα μάζας ενός πυρήνα με ίσο αριθμό πρωτονίων και νετρονίων είναι $\Delta M=0{,}099197$u και η ενέργεια σύνδεσής του ανά νουκλεόνιο είναι 7,7MeV/νουκλεόνιο. Ποιος είναι ο ατομικός αριθμός του πυρήνα;

11. Πρωτόνιο βομβαρδίζει ακίνητο πυρήνα ${}^{7}_{3}Li$ με αποτέλεσμα τη δημιουργία δύο σωματίων ${}^{4}_{2}He$. Αν η αρχική κινητική ενέργεια του πρωτονίου είναι 1MeV, πόση είναι η κινητική ενέργεια των δύο θραυσμάτων ${}^{4}_{2}He$;

ΕΓΚΩΜΙΟ ΤΗΣ ΒΑΣΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η επιστήμη ανταποκρίνεται κατ' αρχάς σε μια ανάγκη που χαρακτηρίζει τον άνθρωπο ως άνθρωπο: την ανάγκη να γνωρίσει. Να ανακαλύψει τους θεμελιώδεις νόμους της φύσης, που διέπουν τον κόσμο στον οποίο ζούμε. Να παρατηρήσει, να ταξινομήσει τα παρατηρούμενα φαινόμενα, να φέρει στην επιφάνεια το απόλυτο και το αναλλοίωτο, μελετώντας τα φαινόμενα κάτω από ειδικές και ασυνήθιστες συνθήκες, δημιουργημένες από την ανθρώπινη ευφυΐα, αυτή είναι η ψυχή της βασικής έρευνας. Αυτή η έρευνα αναπτύσσεται, και πρέπει να αναπτυχθεί, με σκοπό να αυξάνει και να καθιστά ακριβέστερες τις γνώσεις.

Ωστόσο, ακόμη και αν αυτό μπορεί να φανεί παράδοξο, από αυτή την ελεύθερη έρευνα, πέρα από κάθε ιδέα εφαρμογής, γεννιούνται οι νέες ιδέες οι οποίες επιτρέπουν ακριβώς τις επιπλέον αποτελεσματικές εφαρμογές. Ο πρώτος στόχος της επιστήμης δεν είναι η εφαρμογή. Είναι, το επαναλαμβάνω, η καλύτερη κατανόηση των αιτιών και των νόμων που διέπουν τις φυσικές διαδικασίες. Αλλά μια καλύτερη κατανόηση των φυσικών διαδικασιών οδηγεί σχεδόν πάντοτε στη δυνατότητα να τις ελέγξουμε ή, τουλάχιστον, να ελέγξουμε άλλες διαδικασίες, οι οποίες σχετίζονται με αυτήν που είναι το αντικείμενο της έρευνας. Όπως είναι γνωστό, όσο η επιστήμη αναπτύσσεται τόσο περισσότερες και στενότερες γίνονται οι σχέσεις που καθορίζονται μεταξύ των διαδικασιών οι οποίες αρχικά έμοιαζαν να μην έχουν καμία συγγένεια.

Η μελέτη του ηλιακού στέμματος, για παράδειγμα, μπορεί να οδηγήσει σε μια καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των ισχυρά ιονισμένων αερίων μέσα σε μαγνητικά πεδία. Και αυτό το θέμα αποδεικνύεται ότι έχει μεγάλη τεχνολογική σημασία. Αλλά οι αστροφυσικοί, που παρήγαγαν αυτές τις τεχνολογικά χρήσιμες γνώσεις, δεν είχαν καθόλου ως στόχο αυτή την εφαρμογή. Η εφαρμοσμένη έρευνα είναι εκείνη που μπόρεσε να επωφεληθεί, λίγο αργότερα, από τα αποτελέσματά τους, αξιοποιώντας ένα μέρος τους στη βιομηχανία.

Πρόσφατα ο H. Casimir έδειξε με εξαιρετικό τρόπο ότι οι αποφασιστικές τεχνικές πρόοδοι του 20ού αιώνα έχουν πραγματοποιηθεί από επιστήμονες οι οποίοι σε καμιά περίπτωση δεν εργάζονταν έχοντας ένα σαφώς καθορισμένο πρακτικό στόχο.

«Θα μπορούσε κανείς να αναρωτηθεί», γράφει για παράδειγμα, «αν οι υπολογιστές εφευρέθηκαν από ανθρώπους οι οποίοι ήθελαν να κατασκευάσουν υπολογιστές. Όμως προκύπτει ότι επινοήθηκαν γύρω στο 1930 από φυσικούς που ασχολούνταν με στοιχειώδη σωματίδια, επειδή ενδιαφέρονταν για την Πυρηνική Φυσική. Θα μπορούσε κανείς να αναρωτηθεί αν κάποιος ανακάλυψε τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα θέλοντας να βελτιώσει τα μέσα επικοινωνίας. Δε συνέβη όμως αυτό. Ανακαλύφθηκαν από το Hertz, που επιθυμούσε να προβάλει την ομορφιά της Φυσικής και στηριζόταν στις θεωρητικές διαπιστώσεις του Maxwell».

Ο Casimir πολλαπλασιάζει τα παραδείγματα και συμπεραίνει ότι «στον 20ό αιώνα σχεδόν δεν υπάρχει παράδειγμα καινοτομίας που να μην οφείλεται στη βασική επιστημονική σκέψη». Συμμερίζομαι την άποψή του. Επιπλέον προσθέτω ότι η ερμηνεία αυτού του γεγονότος είναι απλή: ο πειραματισμός και η παρατήρηση στα όρια της επιστήμης απαιτούν τεχνικά μέσα τα οποία υπερβαίνουν τις δυνατότητες της υπάρχουσας τεχνολογίας. Γι' αυτό ένας αριθμός σημαντικών τεχνολογικών επινοήσεων έχει ως αφετηρία όχι την επιθυμία επίτευξης ενός ορισμένου πρακτικού σκοπού, αλλά τις απόπειρες διεύρυνσης των ορίων της γνώσης.

Τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από αυτές τις γενικές σκέψεις είναι πολύ συγκεκριμένα και φλέγοντα σε ό,τι αφορά την έρευνα στη Φυσική, ειδικά στη Φυσική των στοιχειωδών σωματιδίων και στην Αστροφυσική. Πράγματι είναι γνωστό ότι ο αναγκαίος εξοπλισμός για την παρατήρηση της συμπεριφοράς των στοιχειωδών σωματιδίων ή για τη μελέτη των ορίων του Σύμπαντος αποδεικνύεται εξαιρετικά δαπανηρός. Τα τεράστια κονδύλια που χρειάζονται ξεπερνούν συχνά τις δυνατότητες μιας και μόνο χώρας. Εάν έχει κανείς, όπως όντως έχουν ορισμένοι, μια τεχνολογική άποψη της επιστήμης, θα αναρωτηθεί: «γιατί;» Τα μεσόνια και τα κουάρκ δεν εμφανίζονται παρά μόνο όταν η ύλη υποβληθεί σε μια εξαιρετικά υψηλή ενέργεια, που δεν είναι συνήθως εφικτή στη Γη: θα ήταν προτιμότερο να επενδύσουμε αυτά τα κολοσσιαία ποσά σε έρευνες πλησιέστερες προς τις οικονομικές και κοινωνικές μας φροντίδες.

Γι' αυτούς τους ίδιους λόγους η παραπάνω συλλογιστική είναι λανθασμένη, ακόμη και επικίνδυνη. Διότι, αναμφίβολα, από αυτές τις έρευνες θα προκύψουν κάποτε ευεργετικές εφαρμογές, αν τουλάχιστον η ανθρώπινη σύνεση τις προφυλάξει από τον παραλογισμό. Η τεχνητή ραδιενέργεια έφερε επαναστατικές αλλαγές σε πολλούς κλάδους της Ιατρικής. Η διαδικασία της σχάσης είναι μια πηγή ενέργειας που η χρήση της συνεχώς διευρύνεται, είτε για καλό είτε για κακό σκοπό. Όλα οδηγούν στο να πιστέψουμε ότι στο μέλλον η Αστροφυσική και η Φυσική στοιχειωδών σωματιδίων, επειδή θα έχουν αφαιρέσει άλλο ένα μέρος του πέπλου που καλύπτει το άγνωστο, θα έχουν συγκρίσιμα, αν και μη προβλέψιμα αποτελέσματα. Ποιος ξέρει αν ορισμένες από τις δυσκολίες που γεννιούνται με την ανάπτυξη της τεχνολογίας δε θα μπορέσουν να λυθούν χάρη σ' αυτές τις έρευνες;

Θα μου επιτραπεί να προσθέσω, για να ολοκληρώσω, ότι η ανάπτυξη της βασικής έρευνας πρέπει να θεωρηθεί ως ένα είδος καθήκοντος: η ανθρώπινη περιπέτεια αντιστοιχεί, αυτή τη στιγμή, στην περιπέτεια του Σύμπαντος, όπου η φύση, με τη μορφή του ανθρώπου, αρχίζει να κατανοεί τον εαυτό της. Από γενιά σε γενιά, χωρίς ανάπαυλα, πέρα από σύνορα, έχουμε χρέος να συμβάλουμε με μια συλλογική προσπάθεια στη διεύρυνση και στην εμβάθυνση αυτής της κατανόησης. Ίσως είναι μια από τις αρετές της βαριάς Φυσικής το γεγονός ότι έχει επιτρέψει την απόκτηση μιας τέτοιας συνείδησης, διότι απαιτούσε τη συνένωση διανοητών και τη συγκέντρωση κεφαλαίων από όλες τις χώρες.

Απόσπασμα από το βιβλίο *Η κβαντική επανάσταση* του Victor Weisskopf.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3
ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ
ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Τι ονομάζουμε ισότοπους πυρήνες;
Σε τι μοιάζουν τα ισότοπα ενός στοιχείου Χ;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 69.

2. i. Ποιοι από τους παρακάτω πυρήνες περιέχουν τον ίδιο αριθμό:
- πρωτονίων,
- νετρονίων,
- νουκλεονίων;

ii. Ποιοι περιστοιχίζονται από τον ίδιο αριθμό ηλεκτρονίων στο ουδέτερο άτομο;
iii. Ποιοι είναι ισότοπα του ίδιου στοιχείου;
(α) ${}^{12}_{6}C$, (β) ${}^{14}_{6}C$, (γ) ${}^{13}_{6}C$, (δ) ${}^{14}_{7}N$, (ε) ${}^{16}_{8}O$, (ζ) ${}^{17}_{8}O$

Απάντηση: i. Ίδιο αριθμό πρωτονίων (6 πρωτόνια) περιέχουν οι πυρήνες α - β - γ, καθώς και οι ε - ζ (8 πρωτόνια). Ίδιο αριθμό νετρονίων περιέχουν οι γ - δ (7 νετρόνια), καθώς και οι β - ε (8 νετρόνια). Ίδιο αριθμό νουκλεονίων περιέχουν οι β - δ (14 νουκλεόνια).

ii. Οι α - β - γ περιστοιχίζονται από 6 ηλεκτρόνια στο ουδέτερο άτομο και οι ε - ζ περιστοιχίζονται από 8 ηλεκτρόνια στο ουδέτερο άτομο.

iii. Ισότοπα του στοιχείου C είναι οι α - β - γ, ενώ ισότοπα του στοιχείου O είναι οι ε - ζ.

3. Τι ονομάζουμε ενέργεια σύνδεσης ενός πυρήνα;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 70.

4. Ο πυρήνας Χ έχει ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο 8,8MeV, ενώ ο πυρήνας Υ έχει ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο 7,6MeV. Ποιος από τους δύο είναι πιο σταθερός;

Απάντηση: Ο πυρήνας Χ είναι σταθερότερος διότι έχει μεγαλύτερη ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο.

5. Συμπληρώστε τα κενά στο παρακάτω κείμενο:

Η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές για πυρήνες ..... μαζικών αριθμών. Όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο ενός πυρήνα τόσο ..... είναι ο πυρήνας.

Ένας πυρήνας με μεγάλο μαζικό αριθμό έχει ..... ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο από έναν πυρήνα μεσαίου μαζικού αριθμού και μπορεί να ..... σε δύο μεσαίους πυρήνες ..... ενέργεια υπό μορφή .... των θραυσμάτων.

Απάντηση: Η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές για πυρήνες **μεσαίων** μαζικών αριθμών. Όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο ενός πυρήνα τόσο **σταθερότερος** είναι ο πυρήνας.

Ένας πυρήνας με μεγάλο μαζικό αριθμό έχει **μικρότερη** ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο από έναν πυρήνα μεσαίου μαζικού αριθμού και μπορεί να **διασπαστεί** σε δύο μεσαίους πυρήνες **αποδεσμεύοντας** ενέργεια υπό μορφή **κινητικής ενέργειας** των θραυσμάτων.

6. Στο πείραμα του Rutherford υποθέστε ότι ένα σωμάτιο α μικρής κινητικής ενέργειας κατευθύνεται μετωπικά προς τον πυρήνα ενός ατόμου. Γιατί το σωμάτιο δεν έρχεται σε επαφή με τον πυρήνα;

Απάντηση: Ο πυρήνας ασκεί απωστική ηλεκτρική δύναμη στο σωμάτιο, η οποία μάλιστα γίνεται όλο και πιο ισχυρή, καθώς το σωμάτιο πλησιάζει τον πυρήνα. Για να υπερνικηθεί η δύναμη αυτή, πρέπει το σωμάτιο να έχει αρχικά πολύ υψηλή κινητική ενέργεια. Βλ. και σελίδα 73 καθώς και παράδειγμα 3-4.

7. Πώς εξηγείται το ότι ένας πυρήνας δε διασπάται, αν και τα πρωτόνιά του απωθούνται αμοιβαία μεταξύ τους;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 73.

8. Ποιες είναι οι σημαντικότερες ιδιότητες της ισχυρής πυρηνικής δύναμης;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 73.

9. Να αντιστοιχίσετε τις διάφορες αλληλεπιδράσεις με τα σωματίδια φορείς τους:

(α) ισχυρή	(Α) φωτόνιο
(β) ασθενής	(Β) βαρυτόνιο
(γ) βαρυτική	(Γ) W^+, W^-, Z^0
(δ) ηλεκτρομαγνητική	(Δ) γκλουόνιο

Απάντηση: (ισχυρή - γκλουόνιο), (ασθενής - W^+, W^-, Z^0), (βαρυτική - βαρυτόνιο), (ηλεκτρομαγνητική - φωτόνιο).

10. Το περιεχόμενο σε quarks του νετρονίου είναι udd. Ποιο είναι το περιεχόμενο σε quarks του αντινετρονίου; Το νετρόνιο και το αντινετρόνιο ταυτίζονται;

Απάντηση: Ένα αδρόνιο Α, που είναι αντισωμάτιο κάποιου άλλου αδρονίου Β, αποτελείται από τα αντι-quarks του Β. Συνεπώς η δομή του αντινετρονίου είναι (udd).
Το νετρόνιο και το αντινετρόνιο δεν ταυτίζονται παρ' όλο που έχουν και τα δύο μηδενικό φορτίο. Δίνουν διαφορετικά προϊόντα κατά τις διασπάσεις τους.

11. Ποια στοιχειώδη σωματίδια υπάρχουν στην ύλη που παρατηρούμε σήμερα στο Σύμπαν;

Απάντηση: Στην ύλη που παρατηρούμε σήμερα στο Σύμπαν υπάρχουν: νουκλεόνια που δομούνται από up και down quarks, ηλεκτρόνια, νετρίνα και τα σωματίδια φορείς των αλληλεπιδράσεων.

12. Χαρακτηρίστε καθεμιά από τις παρακάτω προτάσεις ως σωστή ή λάθος:
α. Ένα ποζιτρόνιο και ένα ηλεκτρόνιο εξαϋλώνονται και στη θέση τους παράγεται ένα φωτόνιο.
β. Ένα λεπτόνιο (μ) αλληλεπιδρά με ένα πρωτόνιο με ισχυρή αλληλεπίδραση ανταλλάσσοντας ένα γκλουόνιο.
γ. Τα λεπτόνια είναι συνολικά έξι, εκ των οποίων τα τρία μόνο έχουν ηλεκτρικό φορτίο.
δ. Ένα αδρόνιο αποτελείται από τα παρακάτω δύο quarks: (u, d).
ε. Σε κάθε στοιχειώδες σωματίδιο αντιστοιχεί και ένα αντισωματίδιο.

Απάντηση: (α - Λάθος), (β - Λάθος), (γ - Σωστή), (δ - Λάθος), (ε - Σωστή).

13. Ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο με αμελητέες κινητικές ενέργειες εξαϋλώνονται και σχηματίζονται δύο φωτόνια. Πόση ενέργεια έχουν συνολικά τα δύο φωτόνια;

Απάντηση: Εφόσον το ηλεκτρόνιο και το ποζιτρόνιο δεν έχουν κινητικές ενέργειες, η συνολική τους ενέργεια είναι μόνο η ισοδύναμη προς τη μάζα ηρεμίας τους, δηλαδή $2m_ec^2$. Τόση πρέπει να είναι και η συνολική ενέργεια των δύο φωτονίων, αφού ισχύει η διατήρηση της ενέργειας.

14. Συμπληρώστε τα κενά στο παρακάτω κείμενο:
Τα νουκλεόνια δομούνται από .....
Τα λεπτόνια είναι μια ξεχωριστή κατηγορία στοιχειωδών σωματιδίων, που δε συμμετέχουν σε ..... αλληλεπιδράσεις. Τα ..... είναι οι φορείς των ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων. Δύο quarks αλληλεπιδρούν ισχυρά ανταλλάσσοντας ένα .....

Απάντηση:
Τα νουκλεόνια δομούνται από **quarks**.
Τα λεπτόνια είναι μια ξεχωριστή κατηγορία στοιχειωδών σωματιδίων, που δε συμμετέχουν σε **ισχυρές** αλληλεπιδράσεις. Τα **φωτόνια** είναι οι φορείς των ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων. Δύο quarks αλληλεπιδρούν ισχυρά ανταλλάσσοντας ένα **γκλουόνιο**.

15. Τι είναι η μεταστοιχείωση;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 80.

16. Ποιο φαινόμενο ονομάζεται ραδιενέργεια; Ποια είδη ραδιενεργών ακτινοβολιών υπάρχουν;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 80. Οι ραδιενεργές ακτινοβολίες είναι οι α, β, γ.

17. Τι ονομάζουμε χρόνο ημιζωής ενός ραδιενεργού πυρήνα;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 83.

18. Γιατί, όσο αυξάνεται ο ατομικός αριθμός των πυρήνων, χρειάζεται να υπάρχουν όλο και περισσότερα νετρόνια, για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα των πυρήνων;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 80.

19. Ένα φιλμ που βρίσκεται μέσα σε ένα κουτάκι από παχύ χαρτόνι κινδυνεύει να προσβληθεί από παρακείμενες πηγές:
i. ακτίνων α
ii. ακτίνων γ
iii. ακτίνων β

Απάντηση: Οι ακτίνες β και γ μπορούν να διαπεράσουν το παχύ χαρτόνι.

20. Υποθέστε ότι μία δέσμη περιέχει σωματίδια α, β και γ, τα οποία θέλουμε να διαχωρίσουμε. Υποδείξετε κατάλληλο πειραματικό τρόπο.

Απάντηση: Ο διαχωρισμός μπορεί να γίνει κατά τη διέλευσή τους μέσα από μαγνητικό πεδίο. Τα σωματίδια α και β εκτρέπονται προς αντίθετες κατευθύνσεις, ενώ τα γ δεν εκτρέπονται. Τη φορά εκτροπής των σωματιδίων α και β καθορίζει ο κανόνας του δεξιού χεριού για τη δύναμη Laplace.

21. Ποιος πυρήνας θα προέλθει από τη διάσπαση β^- ενός πυρήνα $^{14}_{6}C$;

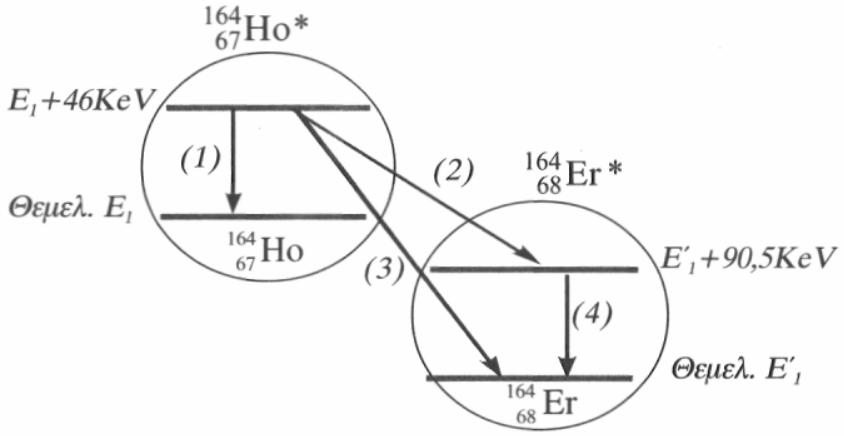
Απάντηση: Ο πυρήνας του $^{14}_{7}N$. Βλ. και σελίδα 82.

22. Το παρακάτω σχήμα δείχνει διαφορετικές διασπάσεις μιας αρχικά διεγερμένης κατάστασης του πυρήνα $^{164}_{67}Ho$, η οποία διασπάται κατά διάφορους τρόπους:

α. Χαρακτηρίστε καθεμιά από αυτές ως διάσπαση α, διάσπαση β και διάσπαση γ.

β. Για όποιες από αυτές είναι διασπάσεις γ υπολογίστε τις αντίστοιχες ενέργειες των φωτονίων που παράγονται.

γ. Για όποιες από αυτές είναι διασπάσεις β συμπληρώστε τις αντίστοιχες αντιδράσεις.



Απάντηση:

α. Η διάσπαση (1) δίνει πυρήνα του ίδιου στοιχείου αλλά μικρότερης ενέργειας. Συνεπώς είναι διάσπαση γ. Το ίδιο συμβαίνει και με τη διάσπαση (4). Οι διασπάσεις (2) και (3) δίνουν πυρήνες που έχουν ατομικό αριθμό μεγαλύτερο κατά 1 από τον αρχικό πυρήνα. Συνεπώς είναι διασπάσεις β.

β. Η διάσπαση (1) δίνει φωτόνιο ενέργειας 46KeV. Η διάσπαση (4) δίνει φωτόνιο ενέργειας 90,5KeV.

γ. Οι διασπάσεις (2) και (3) περιγράφονται από την αντίδραση:

$$^{164}_{67}Ho \rightarrow {}^{164}_{68}Er + e^- + \nu_e$$

23. Ποιες πυρηνικές αντιδράσεις ονομάζουμε σχάσεις και ποιες συντήξεις;

Απάντηση: Βλ. σελίδες 87 και 88.

24. Σε τι διαφέρει ο μηχανισμός σχάσης που γίνεται σε έναν αντιδραστήρα από το μηχανισμό σχάσης σε μια πυρηνική βόμβα;

Απάντηση: Σε έναν αντιδραστήρα οι σχάσεις γίνονται με ελεγχόμενο ρυθμό. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιβράδυνση των νετρονίων που ελευθερώνονται μετά από κάθε σχάση. Στην πυρηνική βόμβα η αλυσιδωτή αντίδραση της σχάσης εξελίσσεται ταχύτατα χωρίς έλεγχο και ακολουθεί έκλυση πολύ μεγάλης ενέργειας σε μικρό χρόνο.

25. Σε οποιαδήποτε πυρηνική αντίδραση ισχύουν οι παρακάτω ιδιότητες:
α. Τα αθροίσματα των ατομικών αριθμών στο πρώτο και στο δεύτερο μέλος της αντίδρασης είναι ίσα.
β. Τα αθροίσματα των μαζικών αριθμών στο πρώτο και στο δεύτερο μέλος της αντίδρασης είναι ίσα.
Εξηγήστε ποιοι βασικοί νόμοι διατήρησης δικαιολογούν τις ιδιότητες αυτές.

Απάντηση:

α. Δικαιολογείται από τη διατήρηση του φορτίου.
β. Δικαιολογείται από τη διατήρηση του αριθμού των νουκλεονίων.

26. Ποιες από τις παρακάτω αντιδράσεις είναι πυρηνικές συντήξεις και ποιες πυρηνικές σχάσεις;

$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{94}_{38}Sr + ^{140}_{54}Xe + 2^{1}_{0}n$$

$$^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{3}_{1}H + ^{1}_{1}H$$

$$^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n$$

$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{88}_{38}Sr + ^{136}_{54}Xe + 12^{1}_{0}n$$

Απάντηση:

$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{94}_{38}Sr + ^{140}_{54}Xe + 2^{1}_{0}n$, σχάση

$^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{3}_{1}H + ^{1}_{1}H$, σύντηξη

$^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n$, σύντηξη

$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{88}_{38}Sr + ^{136}_{54}Xe + 12^{1}_{0}n$, σχάση

ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Για τα προβλήματα να θεωρηθούν γνωστά τα παρακάτω φυσικά μεγέθη:
$|q_e|=|q_p|=1{,}6\text{x}10^{-19}$C
$m_p=1{,}6726\text{x}10^{-27}kg=1{,}007277$u
$m_n=1{,}6750\text{x}10^{-27}kg=1{,}008665$u
$m_e=9{,}109\text{x}10^{-31}kg=5{,}486\text{x}10^{-4}$u

Μάζα του ουδέτερου ατόμου ${}^{1}_{1}\text{H}=1{,}00783$u

Μάζα του ουδέτερου ατόμου ${}^{7}_{3}\text{Li}=7{,}01600$u

Μάζα του ουδέτερου ατόμου ${}^{4}_{2}\text{He}=4{,}00260$u

Μάζα του ουδέτερου ατόμου ${}^{56}_{26}\text{Fe}=55{,}934939$u

Μάζα του ουδέτερου ατόμου ${}^{230}_{90}\text{Th}=230{,}033128$u

Μάζα του ουδέτερου ατόμου ${}^{226}_{88}\text{Ra}=226{,}025403$u

$1\text{u}=1{,}66055\text{x}10^{-27}$kg,
Αριθμός Avogadro$=6{,}023\text{x}10^{23}$ πυρήνες/mole πυρήνων,
$1\text{MeV}=4{,}45\text{x}10^{-20}$KWh και $c=3\text{x}10^{8}$m/s.

1. Χρησιμοποιήστε ενεργειακές μεθόδους, για να υπολογίσετε την ελάχιστη απόσταση που μπορεί να πλησιάσει ένα σωμάτιο α το οποίο βάλλεται μετωπικά από πολύ μακριά, με αρχική ενέργεια 0,5MeV, εναντίον ενός ακίνητου πυρήνα ${}^{197}_{79}\text{Au}$. Υποθέστε ότι ο πυρήνας παραμένει σε ηρεμία κατά την κρούση. Πόση θα ήταν η απόσταση αυτή, αν η ενέργεια του σωματίου ήταν 3,5MeV;

Απάντηση: Αρχικά το σωμάτιο α έχει κινητική ενέργεια K. Στην πλησιέστερη απόσταση r από τον πυρήνα, όπου και σταματάει στιγμιαία, έχει μόνο δυναμική ενέγεια:

$$U=k\frac{q_1q_2}{r}=k\frac{(2e)(79e)}{r}$$

Η διατήρηση της μηχανικής ενέργειας δίνει: $K=k\dfrac{(2e)(79e)}{r}\Rightarrow r=k\dfrac{(2e)(79e)}{K}$

Με αντικατάσταση παίρνουμε: $r=9\cdot10^{9}\dfrac{\text{N}\cdot\text{m}^2}{\text{C}^2}\dfrac{(2\cdot1{,}6\cdot10^{-19}\,\text{C})(79\cdot1{,}6\cdot10^{-19}\,\text{C})}{0{,}5\cdot1{,}6\cdot10^{-13}\,\text{J}}$

ή $r=4{,}55\cdot10^{-13}\,\text{m}$.

Για K=3,5MeV βρίσκουμε αντίστοιχα: $r=6{,}5\cdot10^{-14}\,\text{m}$

Παρατηρούμε ότι οι αποστάσεις αυτές είναι μεγαλύτερες από την τυπική ακτίνα του πυρήνα Au και έτσι το σωμάτιο α δεν μπορεί να εισχωρήσει σ' αυτόν.

2. Υπολογίστε την ενέργεια σύνδεσης, καθώς και την ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο για τον πυρήνα $^{56}_{26}Fe$.

Απάντηση:

Το έλλειμμα μάζας του πυρήνα $^{56}_{26}Fe$ είναι: $\Delta M = 26m_p + 30m_n - M_{πυρ} =$
$= 26(1{,}007276)u + 30(1{,}008665)u - [55{,}934939u - 12(0{,}000549)u] \simeq 0{,}52u$
Τότε $E_B = 0{,}52x931{,}48MeV = 484{,}37MeV$.

Η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο είναι: $\frac{E_B}{56} = 8{,}649$ MeV/νουκλεόνιο

3. Ο χρόνος ημιζωής του ^{131}I είναι 8,04 ημέρες. Υπολογίστε τη σταθερά διάσπασης του ισότοπου αυτού. Βρείτε επίσης τον αριθμό των πυρήνων ^{131}I που περιέχονται σε ένα δείγμα ενεργότητας $1{,}85x10^4$ Bq.

Απάντηση: Η σταθερά διάσπασης λ είναι:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0{,}693}{8{,}04 \cdot 86400\,s} = 9{,}98 \cdot 10^{-7}\,s^{-1}$$

Η ενεργότητα ισούται με λN, όπου N ο αριθμός των πυρήνων του δείγματος τη στιγμή που μετράμε την ενεργότητα. Συνεπώς:

$$N = \frac{ενεργ\acute{o}τητα}{\lambda} = \frac{1{,}85 \cdot 10^4\,s^{-1}}{9{,}98 \cdot 10^{-7}\,s^{-1}} = 1{,}85 \cdot 10^{10}\,πυρ\acute{η}νες$$

4. Ένα δείγμα κάποιου ραδιοϊσότοπου, μόλις παρασκευαστεί, έχει ενεργότητα $37x10^7$ Bq. Μετά από 4 ώρες η ενεργότητα του δείγματος έγινε $29{,}6x10^7$ Bq.
Βρείτε τη σταθερά διάσπασης και το χρόνο ημιζωής του ισότοπου.
Ποια θα είναι η ενεργότητα του δείγματος 30 ώρες μετά την παρασκευή του;

Απάντηση: Η ενεργότητα του δείγματος αμέσως μετά την παρασκευή του είναι $\lambda N_0 = 37x10^7$ διασπάσεις/s (1). Μετά από $t_1 = 4h$ οι πυρήνες που έχουν απομείνει είναι $N = N_0 \cdot e^{-\lambda t_1}$ (2) και η ενεργότητα τότε είναι $\lambda N = 29{,}6x10^7$ διασπάσεις/s (3).
Από (1) και (2) βρίσκουμε, διαιρώντας κατά μέλη, ότι:

$$\frac{N}{N_0} = 0{,}8 \text{ ή } N = 0{,}8N_0 \quad (4)$$

Αντικαθιστώντας την (4) στην (3) βρίσκουμε: $0{,}8N_0 = N_0 \cdot e^{-\lambda t_1}$
Από την τελευταία σχέση λογαριθμίζοντας βρίσκουμε:

$$\lambda = -\frac{\ln 0{,}8}{4h} = 0{,}0558\,h^{-1} \quad \text{ή} \quad \lambda = \frac{0{,}0558\,h^{-1}}{3600\,s/h} = 1{,}55\cdot 10^{-5}\,s^{-1}$$

Ο χρόνος ημιζωής είναι: $T_{1/2} = \dfrac{0{,}693}{\lambda} = 12{,}42\,h$

Η ενεργότητα μετά από χρόνο t_2=30h θα είναι:

$$\text{ενεργότητα} = \lambda N' = \lambda N' = \lambda N_0 \cdot e^{-\lambda t_2} = (37\cdot 10^7\ \text{διασπ}./s)(e^{-0{,}0558x30}) =$$

$$= (37\cdot 10^7\ \text{διασπ}./s)(e^{-1{,}674}) = 6{,}937\cdot 10^7\ \text{διασπ}/s.$$

5. Υπολογίστε την κινητική ενέργεια ενός σωματίου α που εκπέμπεται από ένα ακίνητο πυρήνα $^{230}_{90}Th$. Αγνοήστε την κινητική ενέργεια του θυγατρικού πυρήνα $^{226}_{88}Ra$.

Απάντηση: Κατά τη διάσπαση α ενός πυρήνα $^{230}_{90}Th$ έχουμε:

$$^{230}_{90}Th \rightarrow {}^{226}_{88}Ra + {}^{4}_{2}He$$

Αν M_{Th} είναι η μάζα του μητρικού πυρήνα, M_{Ra} η μάζα του θυγατρικού πυρήνα και M_{He} η μάζα του σωματίου α, τότε η διαφορά μαζών μεταξύ μητρικού πυρήνα και προϊόντων είναι:

$$M_{Th} - M_{Ra} - M_{He} = 230{,}033128u - 226{,}025403u - 4{,}00260u =$$

$$= 5{,}125x10^{-3}u = (5{,}125x10^{-3}u)(931{,}48MeV/u) \simeq 4{,}77MeV$$

Η ενέργεια αυτή εμφανίζεται ως κινητική ενέργεια του σωματίου α, αν υποτεθεί ότι ο πυρήνας $^{226}_{88}Ra$ αποκτά αμελητέα κινητική ενέργεια λόγω της μεγάλης μάζας του σε σχέση με τη μάζα του σωματίου α.

6. Συμπληρώστε τις παρακάτω πυρηνικές αντιδράσεις:

$$? + {}^{14}_{7}N \rightarrow {}^{1}_{1}H + {}^{17}_{8}O$$

$$^{7}_{3}Li + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + ?$$

$$^{27}_{13}Al + {}^{4}_{2}He \rightarrow ? + {}^{30}_{15}P$$

$$^{1}_{0}n + ? \rightarrow {}^{7}_{3}Li + {}^{4}_{2}He$$

Απάντηση:

$$^{4}_{2}He + {}^{14}_{7}N \rightarrow {}^{1}_{1}H + {}^{17}_{8}O$$

$$^{7}_{3}Li + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{4}_{2}He$$

$$^{27}_{13}Al + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{1}_{0}n + ^{30}_{15}P$$

$$^{1}_{0}n + ^{10}_{5}B \rightarrow ^{7}_{3}Li + ^{4}_{2}He$$

7. Η πρώτη πυρηνική αντίδραση στην οποία χρησιμοποιήθηκαν σωματίδια προερχόμενα από επιταχυντή πραγματοποιήθηκε από τους Cockroft και Walton και ήταν η παρακάτω:

$^{7}_{3}Li + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{4}_{2}He$

Υπολογίστε την τιμή της ενέργειας Q αυτής της αντίδρασης. Είναι ενδόθερμη ή εξώθερμη;

Απάντηση: Η ενέργεια Q της αντίδρασης υπολογίζεται ως η ισοδύναμη ενέργεια που αντιστοιχεί στη διαφορά μαζών των αντιδρώντων και των παραγόμενων πυρήνων. Ισχύει:

$M_{Li} + M_{H} - 2M_{He} = 7{,}01600u + 1{,}00783u - 2x4{,}00260u = 0{,}01863u$

Με βάση την ισοδυναμία 1u=931,5MeV έχουμε ότι η ενέργεια Q της αντίδρασης είναι: (0,01863u)(931,5MeV/u) $\simeq$ 17,35MeV.

Επειδή η ενέργεια Q είναι θετική, η αντίδραση χαρακτηρίζεται ως εξώθερμη.

8. Υπολογίστε την ενέργεια που αποδεσμεύεται, όταν 1kg ^{235}U παθαίνει σχάση. Λάβετε υπόψη ότι η ενέργεια που αποδεσμεύεται ανά πυρήνα που διασπάται είναι 208MeV.

Απάντηση: 1mole πυρήνων ^{235}U είναι ποσότητα ουρανίου ίση με 235g ή 0,235kg και περιέχει $6{,}023x10^{23}$ πυρήνες. Συνεπώς το 1kg ^{235}U είναι:

$$\frac{1kg}{0{,}235kg/mole} = 4{,}255mol \cdot 6{,}023 \cdot 10^{23} \text{πυρήνες}/mol = 2{,}56 \cdot 10^{24} \text{πυρήνες}$$

Αφού από κάθε πυρήνα που διασπάται αποδεσμεύονται 208MeV, συνολικά αποδεσμεύεται ενέργεια:

$$(2{,}56 \cdot 10^{24} \text{πυρήνες})(208MeV/\text{πυρήνα}) = 5{,}3 \cdot 10^{26} MeV$$

Αν ληφθεί υπόψη ότι 1MeV αντιστοιχεί σε $4{,}45x10^{-20}$ KWh, η ενέργεια που αποδεσμεύεται είναι:

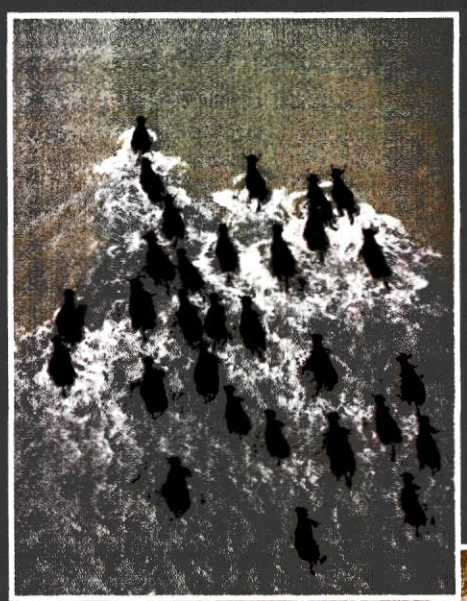
$$5{,}3 \cdot 10^{26} Me \cdot V \cdot 4{,}45 \cdot 10^{-20} KWh/MeV = 23{,}585 \cdot 10^{6} KWh$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

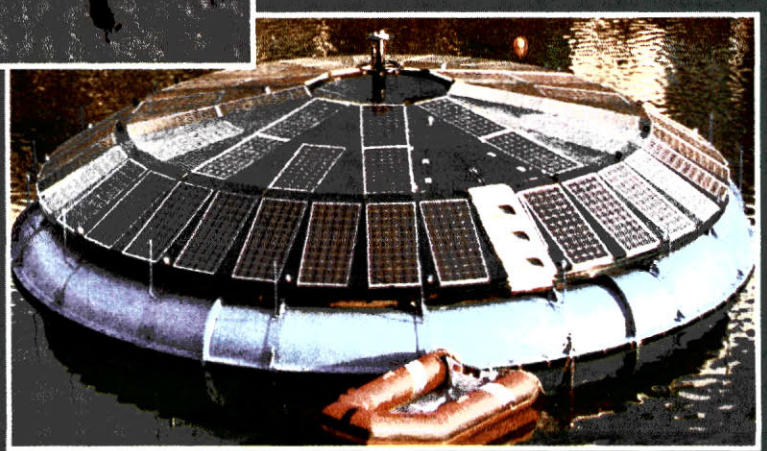
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

- Είδη λαμπτήρων
- Οπτικές ίνες
- Φωτογραφική μηχανή
- Φωτοστοιχεία
- LASER

Η μαγεία της φωτογραφίας. Κοπάδι από βουβάλια εισβάλλει στα ήρεμα νερά μιας λίμνης.



Ο ανθρώπινος οισοφάγος όπως τον παρατηρούμε με ενδοσκόπιο.



Επιστημονικό εργαστήριο οικολογικής οργάνωσης επιπλέει σε έναν υδροβιότοπο. Οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες το τροφοδοτούν με την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια.

Νέοι σε κέντρο διασκέδασης. Λαμπτήρες υπεριώδους ακτινοβολίας σε συνδυασμό με φθορίζοντα υλικά δημιουργούν αυτή τη «φανταστική» εικόνα.

4.1 ΕΙΔΗ ΛΑΜΠΤΗΡΩΝ

Οι άνθρωποι, θέλοντας να συνεχίσουν τις ποικίλες δραστηριότητές τους και μετά τη δύση του Ήλιου, επιδίωκαν πάντα να βρουν τρόπους, ώστε να αντικαταστήσουν αυτή τη φυσική πηγή φωτός με άλλες πηγές. Μέχρι το 19ο αιώνα η φλόγα από την καύση ξύλων ή λαδιού, από λάμπες πετρελαίου, φυσικού ή συνθετικού αερίου ήταν η πηγή φωτός που χρησιμοποιούσαν. Πολλές από τις λάμπες πετρελαίου βρίσκονται ακόμα στις αποθήκες των σπιτιών για περιπτώσεις ανάγκης.

Οι φωτεινές πηγές χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις **θερμές** και τις **ψυχρές φωτεινές πηγές**. Η φωτοβολία των φωτεινών πηγών οφείλεται στη διέγερση και αποδιέγερση των ατόμων. Στις θερμές φωτεινές πηγές προσφέρουμε την ενέργεια για τη διέγερση υπό μορφή θερμότητας. Η φωτοβολία των ψυχρών φωτεινών πηγών οφείλεται στην αποδιέγερση ατόμων αερίων (ή ατμών), που διεγείρονται με τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από τα αέρια ή τους ατμούς.

Οι πιο «δημοφιλείς αντιπρόσωποι» των δύο παραπάνω κατηγοριών είναι ο **λαμπτήρας πυρακτώσεως** (από την κατηγορία των θερμών φωτεινών πηγών) και ο **λαμπτήρας φθορισμού** (από την κατηγορία των ψυχρών φωτεινών πηγών).

Θέλοντας να δώσουμε τον ορισμό του ηλεκτρικού λαμπτήρα θα λέγαμε απλώς ότι: **λαμπτήρας είναι μια διάταξη που μετατρέπει σε φως μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που της προσφέρεται.**

4-1 *Λάμπα πετρελαίου φωτίζει ορεινό καταφύγιο.*

Λαμπτήρες πυρακτώσεως

4-2 Ο πρώτος λαμπτήρας πυρακτώσεως, που κατασκευάστηκε από τον Thomas Edison.

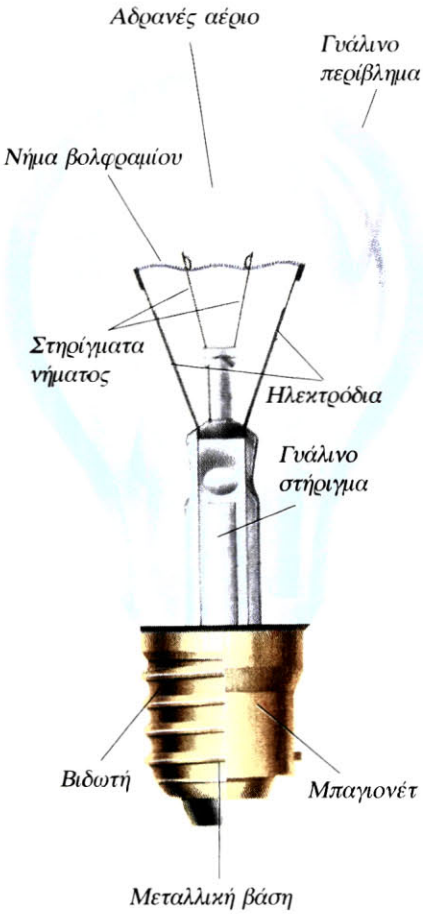
Ο πρώτος λαμπτήρας πυρακτώσεως κατασκευάστηκε τη δεκαετία του 1870 από τον Thomas Edison (Τόμας Έντισον).

Ο λαμπτήρας πυρακτώσεως αποτελείται από τα εξής μέρη:

- το γυάλινο περίβλημα,
- τη μεταλλική βάση,
- τα ηλεκτρόδια,
- το νήμα βολφραμίου,
- τα στηρίγματα του νήματος και
- το γυάλινο στήριγμα των ηλεκτροδίων (σχήμα 4-3).

Το **γυάλινο περίβλημα** προστατεύει το νήμα από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Αυτό πετυχαίνεται με την αφαίρεση του αέρα από το εσωτερικό του και την πλήρωσή του με αδρανές αέριο (άζωτο, αργό ή κρυπτό) υπό πίεση λίγο μικρότερη της ατμοσφαιρικής.

Με την αντικατάσταση του ατμοσφαιρικού αέρα από αδρανές αέριο αποφεύγεται η οξείδωση του νήματος βολφραμίου. Επίσης η παρουσία του αερίου περιορίζει την εξάχνωση του νήματος κατά τη διάρκεια λειτουργίας. Αν επικρατούσε κενό, η εξάχνωση θα ήταν εντονότερη και το νήμα θα καταστρεφόταν πολύ γρήγορα.



4-3 Ο λαμπτήρας πυρακτώσεως και τα τμήματα από τα οποία αποτελείται.

Η **μεταλλική βάση** (βιδωτή ή μπαγιονέτ) σχεδιάστηκε από τον Thomas Edison στην προσπάθειά του να καταστήσει τη διαδικασία τοποθέτησης ή αφαίρεσης του λαμπτήρα σχετικά εύκολη και ακίνδυνη.

Τα **ηλεκτρόδια** είναι φτιαγμένα από νικέλιο και συνδέουν την πηγή τροφοδοσίας με το νήμα μέσω της μεταλλικής βάσης.

Το **νήμα βολφραμίου** είναι το σώμα που φωτοβολεί, όταν πυρακτωθεί με τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος. Είναι διαμορφωμένο σε πολύ πυκνές σπείρες, ώστε να πετυχαίνουμε:

i. την τοποθέτηση νήματος μεγάλου μήκους (που φτάνει το ένα μέτρο) στον περιορισμένο όγκο του λαμπτήρα και

ii. την ελαχιστοποίηση απαγωγής θερμότητας, κατά τη λειτουργία του λαμπτήρα, στο εσωτερικό των σπειρών, με αποτέλεσμα το νήμα να διατηρείται θερμότερο και να εκπέμπει περισσότερο φως.

Γιατί όμως προτιμήθηκε το βολφράμιο για την κατασκευή του νήματος των λαμπτήρων πυρακτώσεως; Είναι γνωστό ότι όσο πιο θερμό είναι ένα σώμα τόσο πιο έντονα ακτινοβολεί. Έπρεπε λοιπόν το υλικό κατασκευής του νήματος να έχει υψηλό σημείο τήξης. Το βολφράμιο, με σημείο τήξης τους 3380°C, πληροί αυτή την προϋπόθεση.

Τα **στηρίγματα του νήματος** κρατούν το νήμα στη θέση του και το προστατεύουν από σπάσιμο, όταν βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία.

Το **γυάλινο στήριγμα** έχει παγιδευμένα τα ηλεκτρόδια και τα στηρίγματα του νήματος.

Η λειτουργία του λαμπτήρα

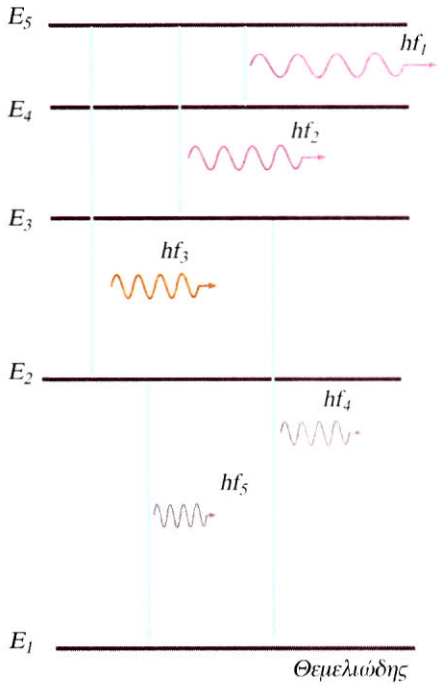
Κλείνοντας το κύκλωμα, στο οποίο είναι συνδεδεμένος ο λαμπτήρας, εφαρμόζεται στα άκρα του μια τάση. Για να λειτουργεί κανονικά ο λαμπτήρας, πρέπει να εφαρμόσουμε στα άκρα του τάση ίση με την τάση **κανονικής λειτουργίας του**. Ο λαμπτήρας τότε διαρρέεται από ρεύμα, ώστε το νήμα βολφραμίου να θερμαίνεται στους 2500° C περίπου.

Τα άτομα του βολφραμίου διεγείρονται και ανέρχονται σε υψηλές στάθμες ενέργειας (π.χ. E_4 και E_5 στο σχήμα 4-4), στις οποίες δεν μπορούν να παραμείνουν, με αποτέλεσμα να επιστρέφουν στη θεμελιώδη με διαδοχικά άλματα στις ενδιάμεσες στάθμες.

Κάθε φορά που ένα άτομο «πέφτει» σε στάθμη χαμηλότερης ενέργειας, εκπέμπεται φως. Η συχνότητα του φωτός που εκπέμπεται είναι $f=\Delta E/h$ (όπου h η σταθερά του Planck και ΔΕ η ενεργειακή μεταβολή). Επειδή τα άτομα «πέφτουν» από μία στάθμη σε άλλη με τυχαίο τρόπο και σε τυχαίες χρονικές στιγμές, εκπέμπεται από το πυρακτωμένο νήμα ένα τεράστιο πλήθος φωτονίων με διαφορετικές συχνότητες, που δεν ξεκινούν όλα μαζί.

Η αποδιέγερση των ατόμων βολφραμίου έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή φωτονίων στην περιοχή του ορατού φωτός κατά ένα μικρό ποσοστό (περίπου 10%). Το υπόλοιπο εκπέμπεται ως υπέρυθρη ακτινοβολία, η οποία θερμαίνει το περιβάλλον.

Όπως γίνεται φανερό από τα παραπάνω, η απόδοση ενός κοινού λαμπτήρα σε φως είναι πολύ μικρή. Ακόμα η διάρκεια ζωής του κυμαίνεται από 750 έως 1500 ώρες λειτουργίας και εξαρτάται από την ισχύ του.



4-4 *Η αποδιέγερση των ατόμων βολφραμίου σε ένα λαμπτήρα πυρακτώσεως γίνεται με τυχαίο τρόπο. (Στην πραγματικότητα στο στερεό σώμα δεν υπάρχουν διακριτές στάθμες αλλά ενεργειακές ζώνες)*

Βελτίωση των λαμπτήρων πυρακτώσεως

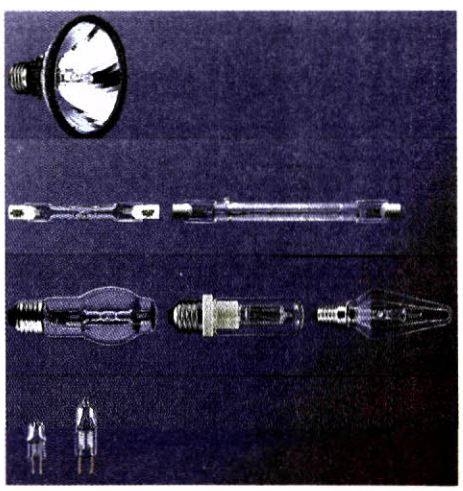
Στην προσπάθειά τους για αύξηση της απόδοσης αλλά και της διάρκειας ζωής των λαμπτήρων πυρακτώσεως, οι ερευνητές κατασκεύασαν τους λαμπτήρες χαλαζία - ιωδίου, γνωστούς ως **λαμπτήρες αλογόνου**.

Σ' αυτούς τους λαμπτήρες η θερμοκρασία του νήματος, κατά τη λειτουργία τους, είναι περίπου 3100°C, ενώ του γυάλινου περιβλήματος, που είναι από χαλαζία, 700°C. Στους 3100°C το νήμα βολφραμίου έχει απόδοση φωτός διπλάσια των συνηθισμένων λαμπτήρων πυρακτώσεως. Στη θερμοκρασία αυτή αυξάνεται η ταχύτητα εξάχνωσης του βολφραμίου και έτσι η διάρκεια ζωής του λαμπτήρα μειώνεται.

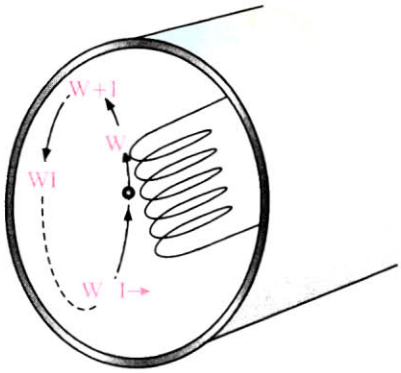
Γεμίζοντας όμως το εσωτερικό του γυάλινου περιβλήματος με αδρανές αέριο και με μικρή ποσότητα ατμών ιωδίου, τα εξαχνούμενα άτομα βολφραμίου επανατοποθετούνται στο νήμα.

Η διαδικασία γενικά έχει ως εξής: όταν μόρια ιωδίου (I_2) πλησιάζουν στο πυρακτωμένο νήμα, διασπώνται σε άτομα ιωδίου (I) και στη συνέχεια διαχέονται προς τα τοιχώματα του περιβλήματος. Εκεί ευνοείται ο σχηματισμός ιωδιούχου βολφραμίου (WI), το οποίο σε αέρια κατάσταση επιστρέφει στο νήμα (σχήμα 4-6).

Στην περιοχή αυτή, λόγω υψηλής θερμοκρασίας, διασπάται σε βολφράμιο, το οποίο επικάθεται στο νήμα, και σε ιώδιο, το οποίο ακολουθεί τον ίδιο κύκλο.

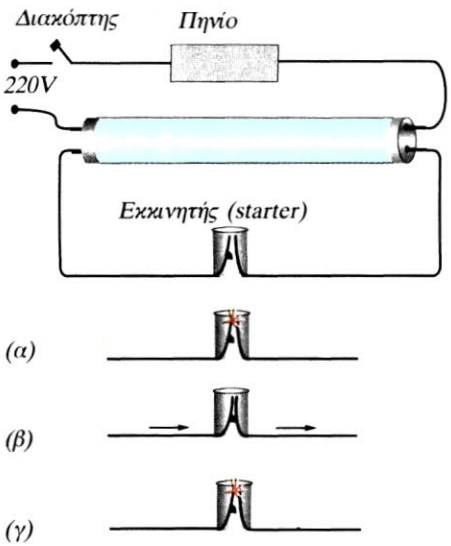


4-5 *Μερικοί τύποι λαμπτήρων αλογόνου που χρησιμοποιούνται για οικιακό φωτισμό.*



4-6 Ο κύκλος αλογόνου στους λαμπτήρες αλογόνου.

4-7 Ο λαμπτήρας φθορισμού και τα τμήματα από τα οποία αποτελείται.



4-8 Το κύκλωμα λειτουργίας του λαμπτήρα φθορισμού και οι φάσεις λειτουργίας του εκκινητή (starter).

Δηλαδή **έχουμε καταλυτική δράση του ιωδίου στην επανασύσταση του νήματος**.

Με τη διαδικασία αυτή, εκτός του ότι «αναζωογονείται» το νήμα, με αποτέλεσμα την αύξηση της ζωής του λαμπτήρα, αποφεύγεται και το μαύρισμα του περιβλήματος, που παρατηρείται στους κοινούς λαμπτήρες, από την προσκόλληση βολφραμίου στο εσωτερικό του.

Λαμπτήρες φθορισμού

Φθορισμός είναι η ιδιότητα μερικών χημικών ουσιών να ακτινοβολούν φως, όταν πάνω τους προσπίπτει αόρατη ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος.

Ένας κοινός λαμπτήρας φθορισμού αποτελείται από:

i. τον κυλινδρικό σωλήνα και

ii. τα νήματα.

Ο **κυλινδρικός σωλήνας** είναι ένας γυάλινος σωλήνας με εσωτερικό επίχρισμα φθορίζουσας ουσίας (κατάλληλης για το χρώμα που επιθυμούμε), η οποία έχει την ιδιότητα να μετατρέπει το αόρατο υπεριώδες φως σε ορατό. Ο σωλήνας περιέχει τα αέρια αργό (Ar) και άζωτο (N) σε χαμηλή πίεση και σταγόνα υδραργύρου (Hg).

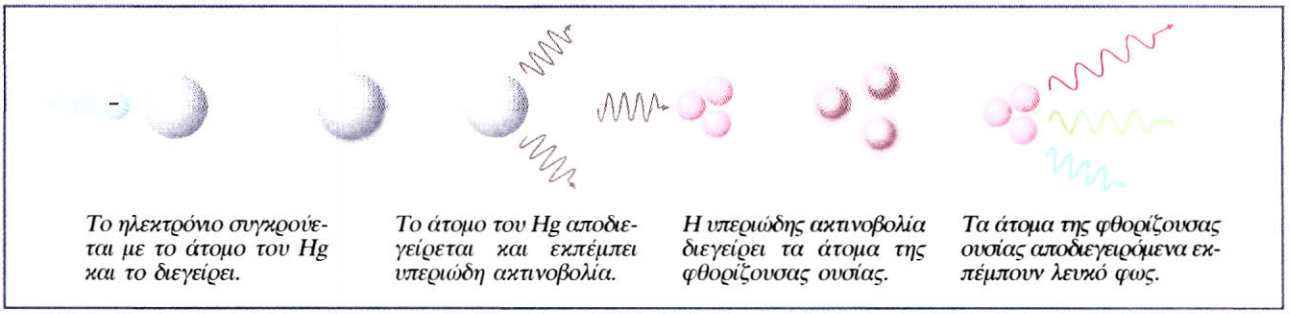
Τα **νήματα** είναι δύο και βρίσκονται στα δύο άκρα (τάπες) του γυάλινου σωλήνα.

Η λειτουργία των λαμπτήρων φθορισμού

Στο σχήμα 4-8 φαίνεται η αρχή λειτουργίας ενός λαμπτήρα φθορισμού. Κλείνοντας το διακόπτη ο λαμπτήρας δεν διαρρέεται αρχικά από ρεύμα. Όμως στον εκκινητή (starter) αρχίζει αμέσως εκκένωση (αίγλης) μεταξύ των ηλεκτροδίων του και διαρρέεται από ρεύμα (σχήμα 4-8α). Το ένα ηλεκτρόδιο του εκκινητή είναι διμεταλλικό έλασμα και, όταν διαρρέεται από ρεύμα, θερμαίνεται, παραμορφώνεται και κλείνει το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων (σχήμα 4-8β). Τότε η εκκένωση (αίγλης) σταματάει και το κύκλωμα διαρρέεται από ισχυρό ρεύμα. Τα ηλεκτρόδια θερμαίνονται και εκπέμπουν ηλεκτρόνια, ενώ ταυτόχρονα εξατμίζεται ο υδράργυρος. Επίσης με τη διακοπή της εκκένωσης (αίγλης) το διμεταλλικό έλασμα δεν διαρρέεται από ρεύμα, οπότε ψύχεται και το κύκλωμα διακόπτεται. Η διακοπή αυτή συνοδεύεται με ανάπτυξη τάσης στα άκρα του λαμπτήρα, μεγαλύτερης του δικτύου (επαγωγικό φαινόμενο λόγω ύπαρξης του πηνίου), και έτσι αρχίζει η εκκένωση μέσα από τους ατμούς υδραργύρου.

Τα ηλεκτρόνια, επιταχυνόμενα από το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των ηλεκτροδίων, συγκρούονται με τα άτομα του υδραργύρου προκαλώντας του ηλεκτρονική διέγερση. Η αποδιέγερση των ατόμων του υδραργύρου έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή υπεριώδους ακτινοβολίας.

Η υπεριώδης ακτινοβολία, όταν προσπίπτει στη φθορίζουσα ουσία (επίχρισμα), προκαλεί τη διέγερση των ατόμων της. Στη συνέχεια, όταν τα άτομα αποδιεγείρονται, εκπέμπουν ορατό φως (σχήμα 4-9).

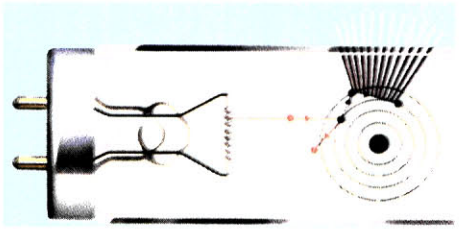


4-9 *Διαδικασία παραγωγής φωτός στους λαμπτήρες φθορισμού.*

Ερμηνεία παραγωγής ορατού φωτός από τη φθορίζουσα επιφάνεια

Η απορρόφηση της υπεριώδους ακτινοβολίας από τη φθορίζουσα ουσία έχει ως αποτέλεσμα τη διέγερση των ατόμων της σε υψηλές ενεργειακές στάθμες. Η επιστροφή αυτών στη θεμελιώδη ενεργειακή στάθμη γίνεται με διαδοχικά άλματα στις ενδιάμεσες στάθμες. Έτσι, αν τα άτομα της φθορίζουσας ουσίας απορροφήσουν φωτόνια ενέργειας $hf_{(\text{υπεριώδους})}$, θα διεγερθούν σε στάθμες υψηλότερης ενέργειας.

Κατά την αποδιέγερση τα άτομα επανέρχονται στη θεμελιώδη κατάσταση με ενδιάμεσα ενεργειακά άλματα. Έτσι το υπεριώδες φως που εκπέμπουν οι ατμοί υδραργύρου επανεκπέμπεται από τη φθορίζουσα ουσία υπό μορφή ορατού φωτός (σχήματα 4-9, 4-10).



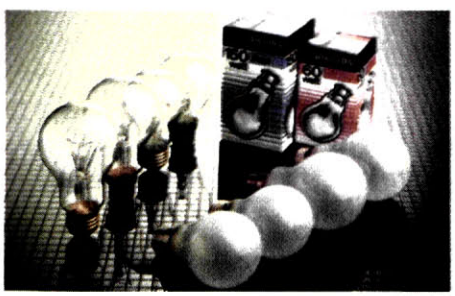
4-10 *Μετατροπή της υπεριώδους ακτινοβολίας σε φως.*

Ποιοτική σύγκριση λαμπτήρων πυρακτώσεως και φθορισμού

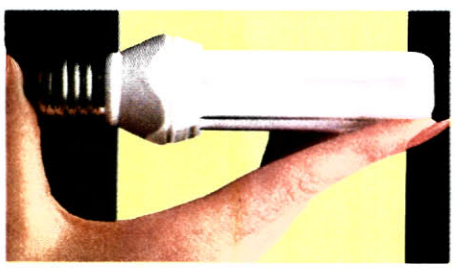
Ο λαμπτήρας φθορισμού υπερτερεί του λαμπτήρα πυρακτώσεως σε διάρκεια ζωής και σε ενεργειακή οικονομία κατά τη χρήση. Υστερεί όμως στο ότι το φως του είναι «ψυχρό», ενώ του λαμπτήρα πυρακτώσεως είναι «θερμό» και απαλό.

Στον πίνακα βλέπουμε μια σύγκριση των δύο τύπων λαμπτήρων για φωτισμό ίδιου χώρου.

	Σύγχρονος λαμπτήρας φθορισμού	**Κοινός λαμπτήρας πυρακτώσεως**
Ισχύς	20 W	100 W
Ημερήσια χρήση	5 ώρες	5 ώρες
Ημερήσια κατανάλωση	0,1 KWh	0,5 KWh
Μηνιαία κατανάλωση	3 KWh	15 KWh
Μηνιαίο κόστος	90 δρχ.	450 δρχ.
Διάρκεια ζωής	8000 ώρες	1000 ώρες



4-11 *Κοινοί λαμπτήρες πυρακτώσεως.*



4-12 *Σύγχρονος λαμπτήρας φθορισμού.*

4.2 ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ (Optical fibers)

4-13 Οπτικές ίνες.

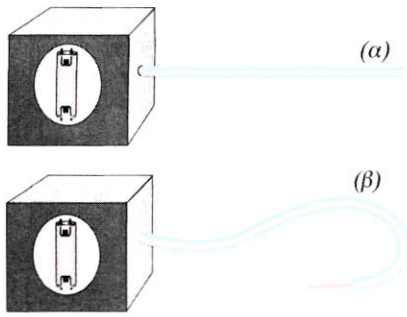
Όπως είναι γνωστό, τα καλώδια κατασκευάζονται από χαλκό ή κράματά του. Όμως ο χαλκός παράγεται σε λίγες μόνο χώρες του κόσμου. Έτσι οι υπόλοιπες χώρες είναι εξαρτημένες από αυτές που τον παράγουν. Οι ερευνητές ωθήθηκαν στο να προτείνουν πιο συμφέρουσες εναλλακτικές λύσεις παρακινούμενοι και από την προσπάθεια απεξάρτησης από τις χώρες παραγωγής χαλκού και από την προσπάθεια αποτροπής υποκλοπών στις τηλεπικοινωνίες καθώς και μεταφοράς μεγαλύτερου «όγκου» πληροφοριών. Έτσι οδηγηθήκαμε στην κατασκευή των οπτικών ινών.

Οι οπτικές ίνες είναι πολύ λεπτές κυλινδρικές ίνες γυαλιού ή πλαστικού με διάμετρο μικρότερη των 8μm (δηλαδή πιο λεπτές από μία τρίχα). Είναι διαφανείς και εύκαμπτες.

Τι επιτυγχάνουμε με τις οπτικές ίνες

Με τη βοήθεια των οπτικών ινών μπορούμε να «αναγκάσουμε» μία φωτεινή δέσμη να ακολουθήσει όποια διαδρομή επιθυμούμε. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι, όπως με ένα εύκαμπτο λάστιχο ποτίσματος μπορούμε να οδηγήσουμε το νερό από τη βρύση σε ένα σημείο του κήπου μας, έτσι και με τις οπτικές ίνες μπορούμε να «οδηγήσουμε» το φως από μία ακίνητη πηγή σε οποιοδήποτε σημείο θέλουμε (σχήμα 4-14 α, β).

Γι' αυτό λέμε ότι μία οπτική ίνα είναι ένας **φωτοαγωγός** ή **φωτοοδηγός**.

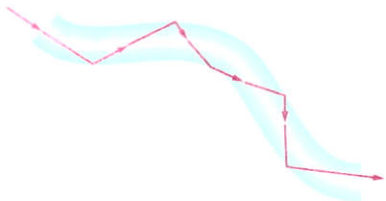


4-14 Οι οπτικές ίνες «οδηγούν» το φως.

Πώς λειτουργούν

Κλείνουμε ένα λαμπτήρα σε ένα αδιαφανές κουτί και τον ανάβουμε. Αυτός δε φωτίζει το περιβάλλον. Τώρα με μία λεπτή βελόνα ανοίγουμε μία οπή στο κουτί. Από αυτό ξεπηδά μία λεπτή ακτίνα φωτός, που διαδίδεται ευθύγραμμα (σχήμα 4-14α).

Στη συνέχεια παίρνουμε μία οπτική ίνα και τη «σφηνώνουμε» στην οπή. Το φως που φτάνει στην άκρη της ίνας προσπίπτει στην κυλινδρική της επιφάνεια, από μέσα, με γωνία μεγαλύτερη από την οριακή γωνία και παθαίνει ολική ανάκλαση. Έτσι το φως μετά από συνεχείς ολικές ανακλάσεις βγαίνει από το άλλο άκρο της οπτικής ίνας, ακόμη κι αν αυτή είναι καμπυλωμένη (σχήματα 4-14β, 4-15).

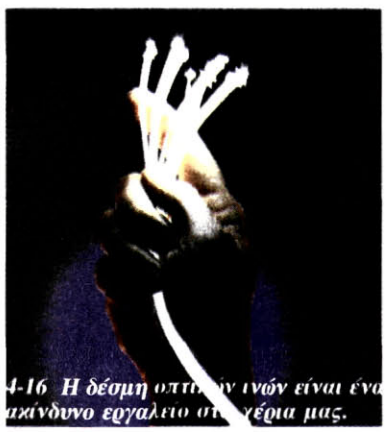


4-15 Η διαδρομή του φωτός μέσα στην οπτική ίνα.

Πώς είναι κατασκευασμένη μία οπτική ίνα

Στην πράξη χρησιμοποιούμε δέσμη οπτικών ινών (σχήμα 4-16). Αν οι ίνες αποτελούνταν μόνο από ένα υλικό, τότε το φως που «ταξιδεύει» στο εσωτερικό τους θα περνούσε, όταν θα έρχονταν σε επαφή, από τη μία ίνα στην άλλη. Γι' αυτό κάθε ίνα επικαλύπτεται με ένα λεπτό στρώμα υλικού μικρότερου δείκτη διάθλασης ή με πολλά λεπτά στρώματα, έτσι ώστε κάθε επόμενο στρώμα να έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης από το προηγούμενο.

Τέλος στο σύστημα της γυάλινης ίνας τοποθετείται ένα περί-



4-16 Η δέσμη οπτικών ινών είναι ένα ακίνδυνο εργαλείο στο χέρι μας.

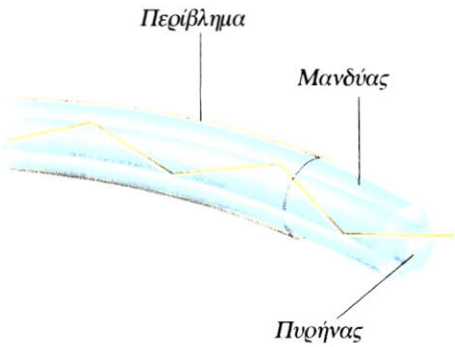
βλημα που την προστατεύει και την κάνει πιο ανθεκτική σε μηχανικές καταπονήσεις.

Όπως γίνεται φανερό από τα παραπάνω, κάθε οπτική ίνα αποτελείται από τρία μέρη:

α. Την κεντρική γυάλινη κυλινδρική ίνα, που ονομάζεται **πυρήνας** και είναι το τμήμα στο οποίο διαδίδεται το φως.

β. Την επικάλυψη (απλή ή πολλαπλή), που είναι ένας ομόκεντρος με τον πυρήνα κύλινδρος. Έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης από τον πυρήνα, για να παθαίνει το φως συνεχείς ολικές ανακλάσεις. Η επικάλυψη αυτή ονομάζεται **μανδύας**.

γ. Το **περίβλημα**, που είναι ένα αδιαφανές πλαστικό (σχήμα 4-17).



4-17 *Η δομή μίας οπτικής ίνας.*

Πόσο μακριά μπορεί να φτάσει το φως μέσα σε μία οπτική ίνα

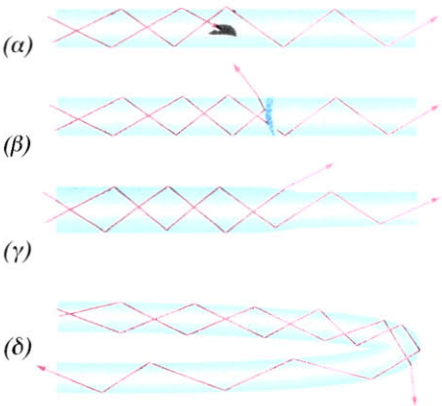
Το φως κατά το «ταξίδι» του σε μία οπτική ίνα εξασθενεί. Αυτό συμβαίνει συνήθως για τους παρακάτω λόγους:

α. Λόγω **απορρόφησης**, που οφείλεται στις ξένες προσμείξεις που υπάρχουν στο γυαλί (σχήμα 4-18α).

β. Λόγω **σκέδασης** το φως διεισδύει στο μανδύα και διασκορπίζεται. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται εντονότερα, αν στην οπτική ίνα υπάρχουν συνδέσεις (σχήμα 4-18β).

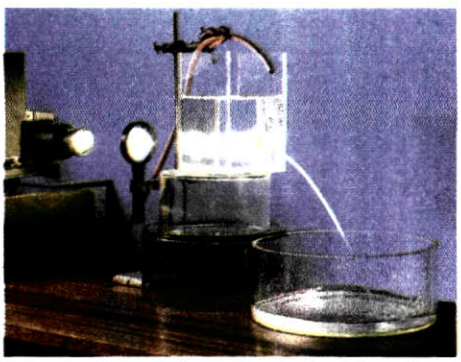
γ. Λόγω **κακής κατασκευής** υπάρχουν στη διάμετρο του πυρήνα, για παράδειγμα, μικροδιακυμάνσεις (σχήμα 4-18γ).

δ. Λόγω **μεγάλης καμπής** της οπτικής ίνας (σχήμα 4-18δ).



4-18 *Τέσσερις περιπτώσεις εξασθένησης του φωτός κατά το «ταξίδι» του στις οπτικές ίνες.*

Αν ο πυρήνας ήταν κατασκευασμένος από κοινό γυαλί, όπως αυτό των τζαμιών των σπιτιών μας, τότε το φως θα «ταξίδευε» μέσα στην ίνα το πολύ ένα μέτρο. Για το λόγο αυτό το γυαλί που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του πυρήνα είναι μεγάλης καθαρότητας. Έτσι το φως μεταφέρεται σε απόσταση πολλών χιλιομέτρων με πολύ μικρές απώλειες. Η καθαρότητα του γυαλιού είναι τέτοια, ώστε, αν θέλαμε να αντικαταστήσουμε το κοινό τζάμι ενός παραθύρου με τζάμι κατασκευασμένο από υλικό ίδιο με αυτό των οπτικών ινών, τότε αυτό, για να έχει την ίδια απορρόφηση φωτός, θα έπρεπε να έχει πάχος 1km περίπου!

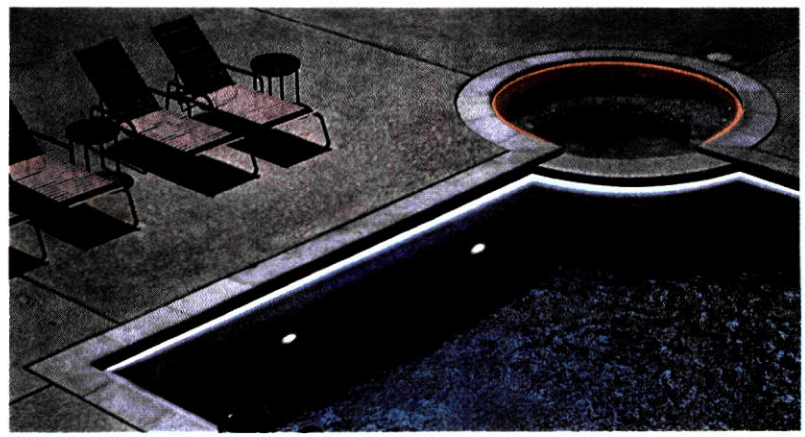


4-19 *Μία φλέβα νερού σε ρόλο οπτικής ίνας. Ο πυρήνας είναι το νερό και ο μανδύας ο αέρας. Ένα πείραμα που μπορεί να γίνει στην τάξη. Στους φωτεινούς υδάτινους πίδακες εφαρμόζεται η ίδια τεχνική.*

Πού τις χρησιμοποιούμε

Οι οπτικές ίνες βρίσκουν πάρα πολλές εφαρμογές. Οπτικές ίνες μεγάλης διαμέτρου και μικρής καθαρότητας (συνήθως πλαστικές) χρησιμοποιούνται στην κατασκευή φωτεινών επιγραφών, στη διακόσμηση και στο φωτισμό πισίνων. Έτσι αποτρέπεται ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας (σχήμα 4-20).

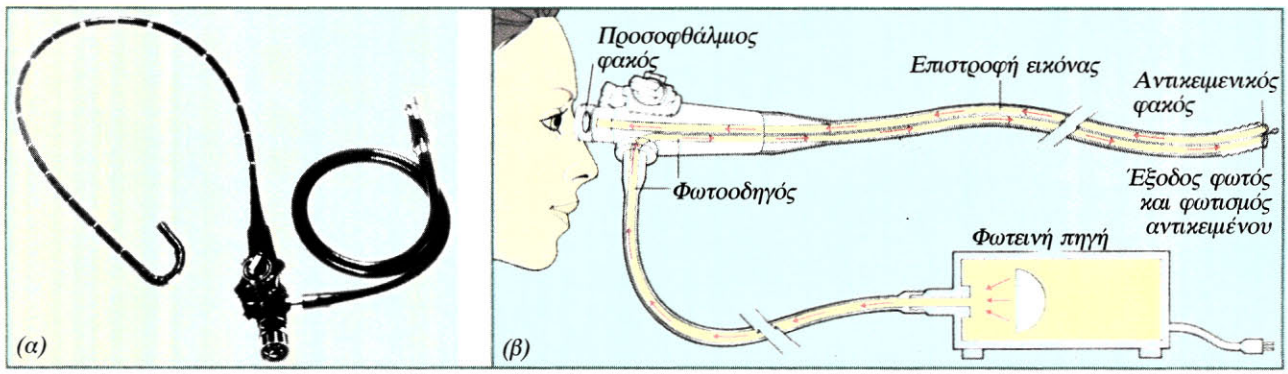
Δέσμη οπτικών ινών (με μία μόνο λάμπα) φωτίζει πολλές προθήκες καταστημάτων ή πολλούς πίνακες ζωγραφικής στις γκαλερί, ώστε να εξοικονομούμε ηλεκτρική ενέργεια (σχήμα 4-22).



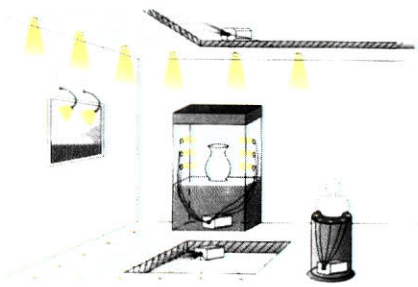
4-20 Οι οπτικές ίνες διακοσμούν το τελεφερίκ και χρησιμοποιούνται στο φωτισμό της πισίνας.

Με τη βοήθεια των οπτικών ινών μπορούμε να παρατηρήσουμε αντικείμενα απρόσιτα σε άμεση παρατήρηση. Έτσι κατασκευάστηκε το ενδοσκόπιο, όργανο που χρησιμοποιείται στην Ιατρική, για να κάνει ορατές ορισμένες εσωτερικές περιοχές του σώματός μας (σχήμα 4-21).

4-21 Φωτογραφία (α) και τρόπος λειτουργίας του ενδοσκοπίου (β).



Παρόμοια συστήματα χρησιμοποιούνται από τους μηχανικούς, για να εντοπίσουν βλάβες στο εσωτερικό των μηχανών.

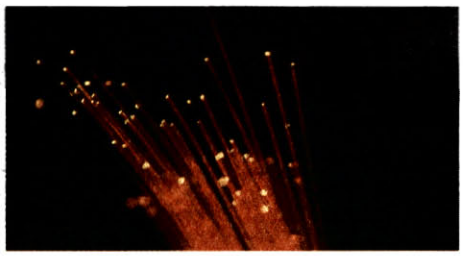


4-22 Σχεδιάγραμμα εγκατάστασης φωτισμού έργων τέχνης με οπτικές ίνες και φωτισμός πινάκων.

Η πιο σημαντική εφαρμογή των οπτικών ινών αφορά τις τηλεπικοινωνίες. Ίσως όλοι μας έχουμε ακούσει για τη χρήση των οπτικών ινών στις ψηφιακές (digital) τηλεπικοινωνίες. Η χρήση τους έφερε την επανάσταση στο χώρο αυτό για τους λόγους που αναφέρουμε παρακάτω:

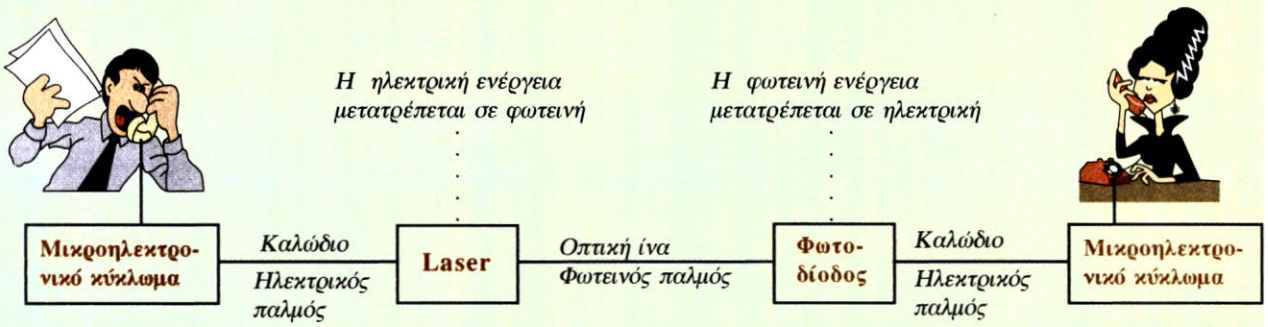
- Με τη βοήθεια μίας ίνας μπορούμε να μεταφέρουμε ταυτόχρονα και χωρίς παρεμβολές χιλιάδες τηλεφωνήματα, δεκάδες εκπομπές τηλεοπτικών καναλιών και μεγάλο αριθμό δεδομένων υπολογιστών.
- Οι διαστάσεις των καλωδίων των οπτικών ινών και το βάρος τους είναι πολύ μικρότερα από τα αντίστοιχα του χαλκού. Λόγου χάρη, ένα καλώδιο οπτικών ινών μπορεί να αντικαταστήσει χάλκινο καλώδιο δεκαπλάσιας, περίπου, διαμέτρου και τριανταπλάσιου, περίπου, βάρους.
- Κατά τη μεταφορά των πληροφοριών δεν έχουμε παράσιτα.
- Είναι πολύ δύσκολη η υποκλοπή (τοποθέτηση «κοριών») ή η συνακρόαση.

- Δε χρειάζονται γείωση.
- Μπορούν να παραχθούν από κάθε χώρα με συνέπεια την απεξάρτησή της από χώρες που παράγουν χαλκό. Έτσι επιτυγχάνεται και τεχνολογική διάχυση. Στην Ελλάδα υπάρχουν εργοστάσια παραγωγής οπτικών ινών, δηλαδή επεξεργασίας του διοξειδίου του πυριτίου, με πρώτη ύλη την άμμο.



4-23 *Το φως μεταφέρει πληροφορίες μέσα από τις οπτικές ίνες που χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες.*

Η αρχή πάνω στην οποία βασίζεται η μετάδοση των πληροφοριών μέσω οπτικών ινών φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Το βασικό στοιχείο του κωδικοποιητή (πομπού) είναι η φωτεινή πηγή. Για μετάδοση σε πολύ μεγάλες αποστάσεις χρησιμοποιούμε laser, ενώ σε μικρές αποστάσεις διόδους φωτοεκπομπής (LED). Η μετάδοση γίνεται με ψηφιακή διαμόρφωση.

Αν κατά την εκπομπή αυξομειώνουμε την ένταση του φωτός, τότε έχουμε αναλογική διαμόρφωση, ενώ, αν αναβοσβήνουμε την πηγή, έχουμε ψηφιακή διαμόρφωση.

Φως → 1, απουσία φωτός → 0.

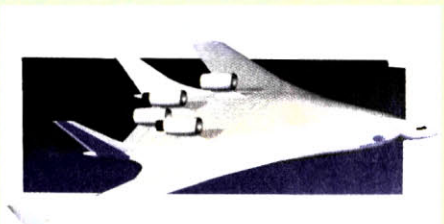
Ο αποκωδικοποιητής είναι συνήθως μία φωτοδίοδος που μετατρέπει το φως σε ηλεκτρικό ρεύμα.

Στην Ελλάδα ο ΟΤΕ έχει αντικαταστήσει μέχρι σήμερα (1999) ένα μεγάλο μέρος του παλιού δικτύου του με δίκτυο οπτικών ινών.

Μερικές ακόμη χρήσεις των οπτικών ινών

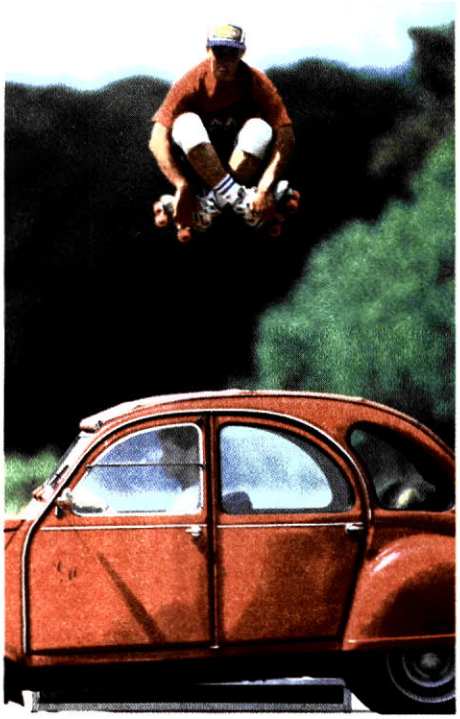
Να αναφέρουμε επίσης ότι οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται σε σύγχρονα επιστημονικά όργανα ανίχνευσης παραμορφώσεων, πίεσης, θερμοκρασίας (ηφαιστείων και πυρηνικών αντιδραστήρων), καθώς και άλλων μεγεθών.

Μελλοντικά οι αεροναυπηγοί προσανατολίζονται στην κατασκευή αεροσκαφών τα οποία, αντί για μεταλλικό περίβλημα, θα έχουν περίβλημα από οπτικές ίνες και πολυμερή. Έτσι μέσω των οπτικών ινών ο πιλότος θα ενημερώνεται συνεχώς για την κατάσταση του αεροσκάφους του, για την πίεση που δέχεται, τη θερμοκρασία σε κάθε σημείο του, για κάποια πιθανή παραμόρφωση κτλ. Θα κατασκευαστούν δηλαδή αεροσκάφη με «δέρμα» που αισθάνεται.

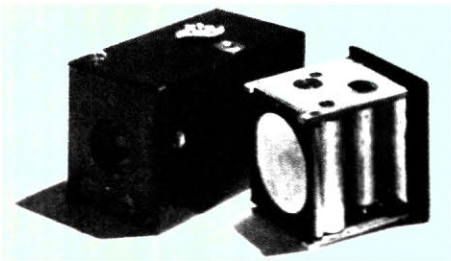


4-24 *Το αεροπλάνο του μέλλοντος. Πιο γρήγορο και πιο ασφαλές.*

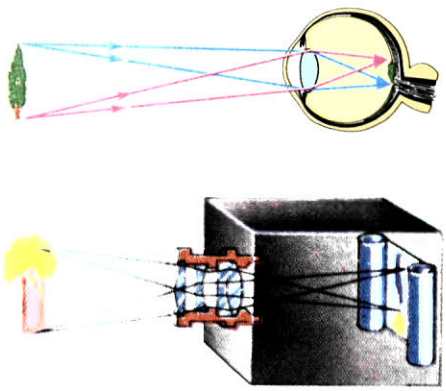
4.3 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ



4-25 Τέτοιο άλμα δε γίνεται κάθε μέρα.



4-26 Η πρώτη φωτογραφική μηχανή της Kodak.



4-27 Η δημιουργία ειδώλου στον αμφιβληστροειδή χιτώνα και στο φιλμ γίνεται με παρόμοιο τρόπο.

Η καταγραφή, μέσω του γραπτού λόγου, των πιο σημαντικών γεγονότων σε κάθε πολιτισμό φαίνεται ότι δεν ικανοποίησε ποτέ τον άνθρωπο. Η «καταγραφή», με τη βοήθεια των εικόνων, αυτών των γεγονότων αλλά και των σημαντικών προσωπικών ή οικογενειακών στιγμών ήταν κάτι που πολύ το επιθυμούσε. Πίστευε αυτό που καθένας από μας σήμερα γνωρίζει, ότι δηλαδή «**μία εικόνα ισοδυναμεί με χίλιες λέξεις**».

Αυτή η επιθυμία του πήρε «σάρκα και οστά» στα μέσα του 19ου αιώνα, όταν για πρώτη φορά μπόρεσε να αποτυπώσει στο χαρτί εικόνες της καθημερινής του ζωής. Όμως η πραγματική επανάσταση έγινε το 1888, όταν η Kodak κυκλοφόρησε στο εμπόριο την πρώτη φωτογραφική μηχανή (σχήμα 4-26), που επέτρεπε σε οποιονδήποτε άνθρωπο να τραβά εύκολα και γρήγορα φωτογραφίες.

Από τότε και μέχρι σήμερα αμέτρητος αριθμός φωτογραφικών μηχανών έχει κατασκευαστεί. Η εξέλιξη των φωτογραφικών μηχανών και η εφαρμογή σ' αυτές των ανακαλύψεων της ηλεκτρονικής τις έχει καταστήσει πολύπλοκες στην κατασκευή αλλά πανεύκολες στη χρήση. Η αρχή λειτουργίας όμως των σύγχρονων φωτογραφικών μηχανών και αυτών που κατασκευάστηκαν για πρώτη φορά παραμένει ίδια.

Η φωτογραφία είναι μια διαδικασία δημιουργίας ειδώλου πάνω σε ένα φιλμ με επικάλυψη από φωτοευαίσθητα υλικά. Η όλη διαδικασία στηρίζεται στους κανόνες της γεωμετρικής οπτικής. Η φωτεινή ενέργεια που φτάνει στο φιλμ προκαλεί χημικές αντιδράσεις με αποτέλεσμα την αποτύπωση της εικόνας σ' αυτό.

Η όλη διαδικασία μοιάζει με την αποτύπωση μιας εικόνας στον αμφιβληστροειδή χιτώνα του ματιού μας (σχήμα 4-27). Μπορούμε λοιπόν να ισχυριστούμε ότι οι φωτογραφικές μηχανές είναι (μηχανικά) αντίγραφα του ματιού. Το ρόλο του βολβού παίζει ο σκοτεινός θάλαμος, το ρόλο του αμφιβληστροειδούς το φιλμ, το ρόλο της ίριδας το διάφραγμα και το ρόλο του φακού του ματιού ένα σύστημα φακών.

Πώς είναι

Η φωτογραφική μηχανή είναι ένα κουτί αδιαπέραστο στο φως (σκοτεινός θάλαμος), που έχει όλα εκείνα τα οπτικά και μηχανικά συστήματα για την εύκολη λήψη φωτογραφιών.

Τα *οπτικά* συστήματα που φέρει μια σύγχρονη φωτογραφική μηχανή είναι:

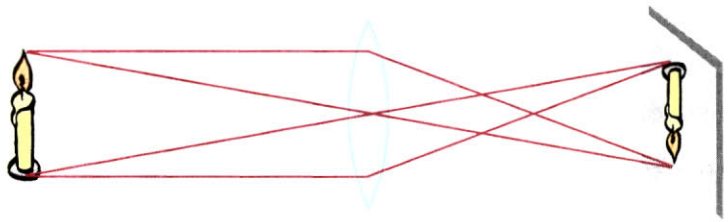
- ο φακός,
- το σύστημα σκόπευσης - εστίασης και
- το φωτόμετρο.

Τα βασικά *μηχανικά* συστήματα είναι:

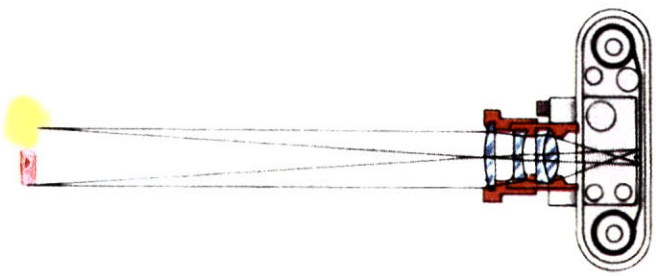
- το κλείστρο και
- ο μηχανισμός μετακίνησης του φιλμ.

Τα οπτικά συστήματα

Ο φακός. Είναι ένα σύστημα φακών (σύνθετος φακός), η απόσταση του οποίου από το φιλμ μεταβάλλεται Έτσι είναι δυνατή η εστίαση των ειδώλων διάφορων αντικειμένων πάνω στο φιλμ. Το όλο σύστημα συμπεριφέρεται ως ένας συγκλίνων φακός κι έτσι στο φιλμ σχηματίζεται είδωλο μικρότερο του αντικειμένου και αναποδογυρισμένο. Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται: (α) η πορεία των ακτίνων από το αντικείμενο μέσα από ένα συγκλίνοντα φακό και η δημιουργία του ειδώλου πάνω σε ένα πέτασμα και (β) η πορεία των ακτίνων σε μια φωτογραφική μηχανή.



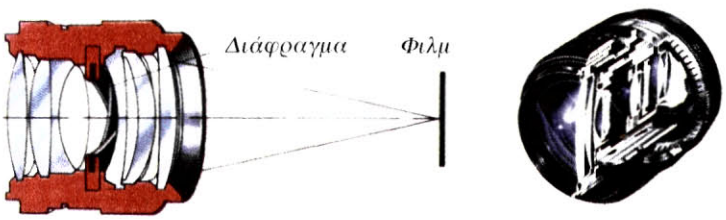
(α)



(β)

Μεταξύ των στοιχείων του φακού υπάρχει πάντα ένα σύστημα αλληλοεπικαλυπτόμενων μεταλλικών ελασμάτων, που είναι διαταγμένα έτσι, ώστε να δημιουργούν μεταξύ τους ένα κυκλικό άνοιγμα (οπή) μεταβλητής διαμέτρου (σχήμα 4-28). Το σύστημα αυτό ονομάζεται **διάφραγμα** ή κεντρικός φωτοφράχτης και ρυθμίζει τη φωτεινότητα του ειδώλου (όπως και η ίριδα του ματιού).

4-28 *Το διάφραγμα και η ίριδα. Όταν έχουμε πολύ φωτισμό, το άνοιγμα είναι μικρό και, όταν έχουμε λίγο φωτισμό, το άνοιγμα είναι μεγάλο.*



Φακός

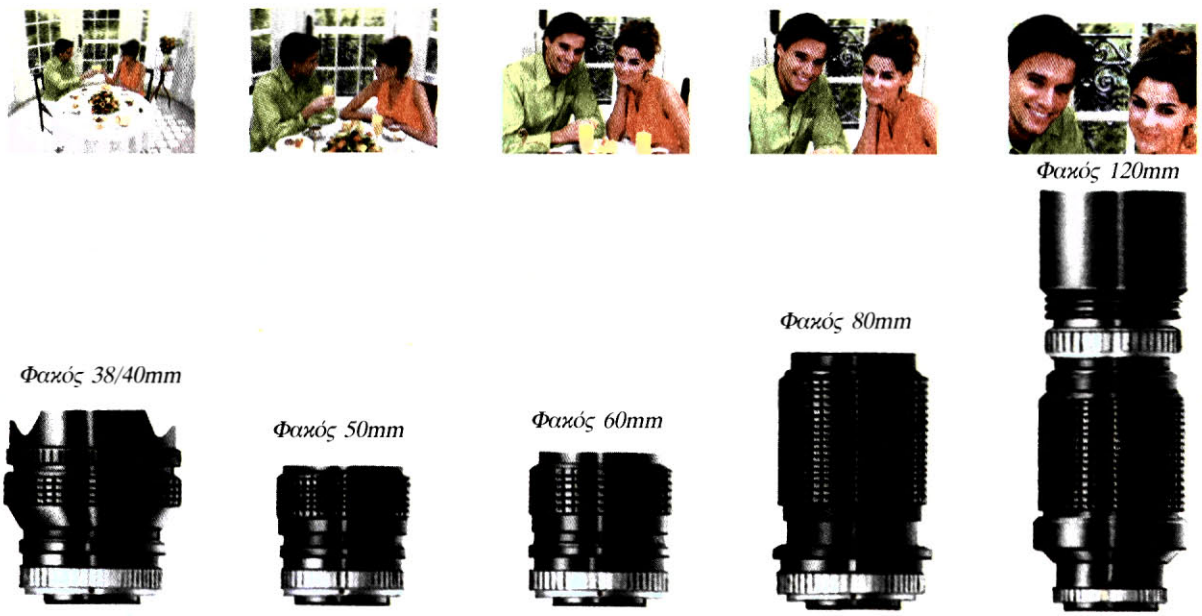
4-29 *Το σύστημα «φακός» της φωτογραφικής μηχανής περιέχει το διάφραγμα στο εσωτερικό του.*

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη σαφήνεια και την καθαρότητα του ειδώλου (και επομένως της φωτογραφίας) είναι η **εστιακή απόσταση του φακού** και το **άνοιγμα του φακού**, δηλαδή η **διάμετρος της οπής του διαφράγματος**.

Γενικά το είδωλο είναι ανάλογο του τετραγώνου της εστιακής απόστασης του φακού. Έτσι μια φωτογραφική μηχανή με «εκατοστάρη» φακό, δηλαδή φακό εστιακής απόστασης f=100mm, δημιουργεί είδωλο τέσσερις φορές μεγαλύτερο του ειδώλου που σχηματίζει φακός με f=50mm.

Φωτογραφίζοντας το ίδιο αντικείμενο με έναν «πενηντάρη» και έναν «εκατοστάρη» φακό, τότε, αν με τον «πενηντάρη» αποτυπώνεται ολόκληρο το αντικείμενο στο φιλμ, με τον «εκατοστάρη» θα αποτυπωθεί το 1/4 του αντικειμένου. Επομένως με φακούς μεγάλης εστιακής απόστασης μπορούμε να φωτογραφίζουμε τμήματα του αντικειμένου.

Για την αποτύπωση όλου του αντικειμένου στο φιλμ πρέπει: (α) ή να μετακινηθεί ο φωτογράφος, αν η μηχανή διαθέτει ένα μόνο φακό, (β) ή να αλλάξει φακό, (γ) ή να αλλάξει την εστιακή απόσταση του φακού, εφόσον η μηχανή έχει τη δυνατότητα αυτή. Στο σχήμα 4-30 φαίνεται ο ρόλος της εστιακής απόστασης του φακού.



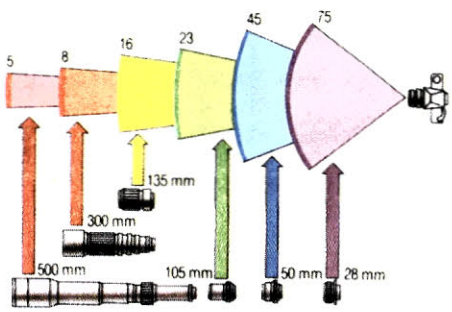
4-30 *Το ίδιο θέμα έχει φωτογραφηθεί με πέντε διαφορετικούς φακούς από την ίδια απόσταση.*

Η διάμετρος της οπής του διαφράγματος ονομάζεται **ενεργό διάφραγμα d** και ο λόγος της εστιακής απόστασης του φακού προς το ενεργό διάφραγμα ονομάζεται **εστιακός λόγος E**.

Δηλαδή: εστιακός λόγος=εστιακή απόσταση φακού / ενεργό διάφραγμα ή E=f/d.

Πάνω στους φακούς είναι χαραγμένη μια κλίμακα με αριθμούς, όπως π.χ. 19 - 11 - 8 - 5,6 - 4 - 2,8 - 2 - 1,4. Αυτές είναι οι τιμές του εστιακού λόγου του φακού. Η μετάβαση από μία τιμή του εστιακού λόγου στην αμέσως μικρότερη συνεπάγεται και διπλασιασμό του φωτισμού του φιλμ.

Πάνω σε κάθε φακό αναγράφονται η εστιακή του απόσταση (π.χ. 50mm), καθώς και η μέγιστη διάμετρός του (π.χ. f/2,8), που αποτελούν τα χαρακτηριστικά γνωρίσματά του. Στις φωτογραφικές μηχανές στις οποίες υπάρχει δυνατότητα αλλαγής των φακών αυτοί χαρακτηρίζονται ως: **Κανονικοί φακοί**: Καλύπτουν οπτικό πεδίο 52° περίπου. **Ευρυγώνιοι**: Με εστιακή απόσταση μικρότερη των κανονικών, καλύπτουν οπτικό πεδίο μεγαλύτερο των 52°. **Τηλεφακοί**: Με εστιακή απόσταση μεγαλύτερη των κανονικών, καλύπτουν οπτικό πεδίο μικρότερο των 52°. **Zoom**: Με μεταβλητή εστιακή απόσταση, χρησιμοποιούνται για φωτογράφιση αντικειμένων από μικρές αποστάσεις. **Macro**: Για φωτογραφίσεις από πάρα πολύ μικρή απόσταση.



4-31 *Φακοί διάφορων εστιακών αποστάσεων σε αντιστοιχία με το οπτικό πεδίο που καλύπτουν.*

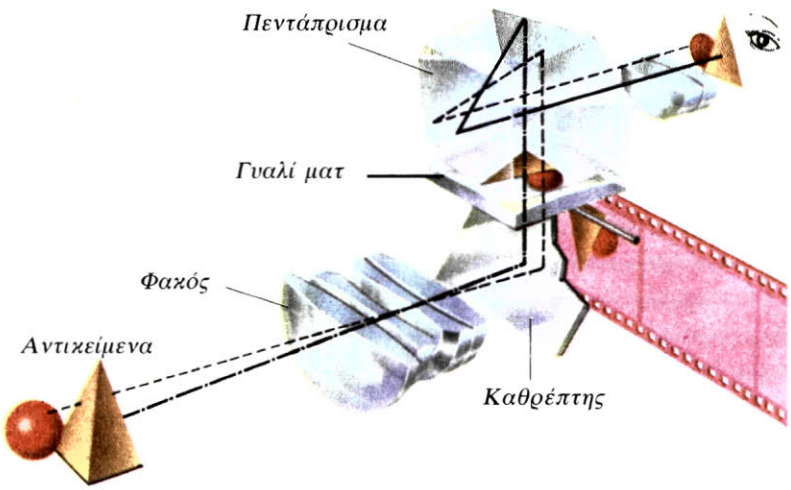
Συστήματα σκόπευσης - εστίασης

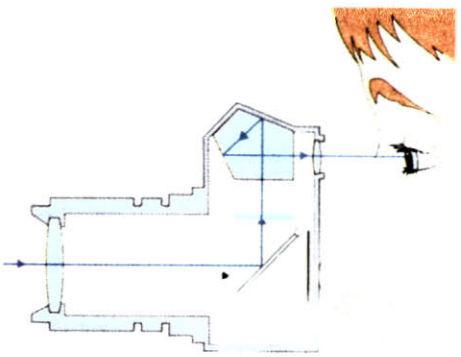
Υπάρχουν τρία βασικά είδη σκοπεύτρου:

α. Τα άμεσης όρασης, που αποτελούνται από έναν απλό σωλήνα τοποθετημένο στο πάνω μέρος ή στο πλάι του κιβωτίου της μηχανής. Με αυτό το είδος σκοπεύτρου έχουμε μια κατά προσέγγιση άποψη του αντικειμένου που φωτογραφίζουμε και το πρόβλημα αυτό γίνεται εντονότερο για πολύ κοντινές φωτογραφίσεις. Επίσης στις μηχανές που χρησιμοποιούν αυτό το σύστημα σκόπευσης ποτέ δε γνωρίζουμε αν η εστίαση είναι σωστή ή ακόμη αν τα δάχτυλά μας είναι μπροστά στο φακό. Γι' αυτό το λόγο οι σύγχρονες φωτογραφικές μηχανές χρησιμοποιούν τα παρακάτω δύο συστήματα σκόπευσης - εστίασης.

β. Το ανακλαστικό σύστημα. Η εστίαση και η σκόπευση με αυτό το σύστημα γίνεται μέσω του φακού. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός καθρέπτη που είναι τοποθετημένος μεταξύ φακού και φιλμ. Το επίπεδο του καθρέπτη σχηματίζει γωνία 45° με τον άξονα του φακού. Ο καθρέπτης εκτρέπει τις ακτίνες προς τα πάνω κατά 90°. Το είδωλο αποτυπώνεται σε ένα γυαλί ματ ή σε μια έδρα πρίσματος (πενταπρίσματος) εκτροπής 90°.

4-32 Φωτογραφική μηχανή με σύστημα άμεσης όρασης.

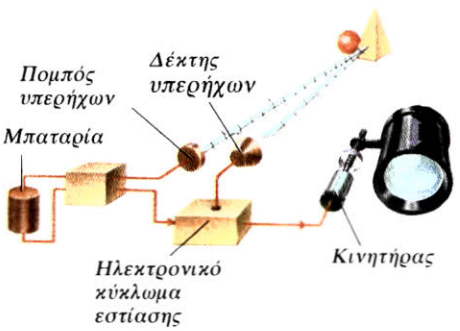




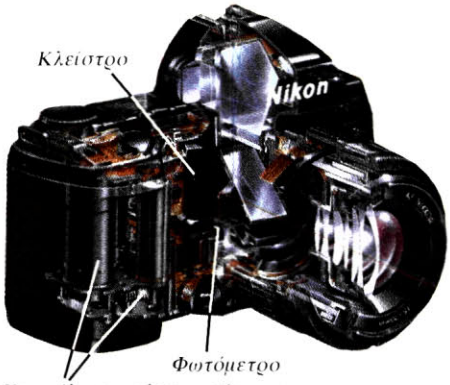
4-33 Η πορεία των ακτίνων σε φωτογραφική μηχανή με ανακλαστικό σύστημα σκόπευσης.

Οι αποστάσεις φακού - κατόπτρου - γυαλιού ματ και φακού - φιλμ είναι ίσες, οπότε το είδωλο που σχηματίζεται στο γυαλί ματ ή στο πρίσμα είναι αυτό που θα σχηματιστεί στο φιλμ. Η σκόπευση - εστίαση γίνεται είτε παρατηρώντας άμεσα το γυαλί ματ είτε μέσω του συστήματος πρίσματος - μεγεθυντικού φακού, όπως στο σχήμα 4-33. Όταν πατηθεί το κουμπί για λήψη φωτογραφίας, ο καθρέπτης παραμερίζεται από τη θέση του και επανέρχεται σ' αυτή μετά την έκθεση του φιλμ στο φως.

γ. Το τηλεμετρικό σύστημα. Η εστίαση με αυτό το σύστημα επιτυγχάνεται, όταν τα δύο είδωλα του αντικειμένου που δίνει το τηλέμετρο συμπέσουν. Αυτό γίνεται με τη μετακίνηση του φακού με το χέρι ή αυτοματοποιημένα με χρήση υπερήχων (σχήμα 4-34) ή αυτοματοποιημένα με χρήση υπέρυθρων ακτίνων.



4-34 Τηλεμετρικό αυτόματο σύστημα σκόπευσης με χρήση υπερήχων.



4-35 Τομή σύγχρονης φωτογραφικής μηχανής με ανακλαστικό σύστημα και ενσωματωμένο φωτόμετρο. Οι μηχανές με ανακλαστικό σύστημα ονομάζονται τύπου Reflex.

(α)

(β)

4-36 (α) Ψηφιακή μηχανή 1999 και (β) σύστημα εκτύπωσης.

Το φωτόμετρο

Είναι μια διάταξη μέσω της οποίας καθορίζεται αυτόματα ο χρόνος έκθεσης του φιλμ στο φως. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες φωτόμετρων: τα φωτόμετρα που μετρούν το φως μέσω του φακού (τα πιο διαδεδομένα) και τα φωτόμετρα εκτός φακού, που μετρούν το μέσο φωτισμό.

Ο αισθητήρας του φωτόμετρου είναι φωτοστοιχείο, φωτοαντίσταση ή φωτοδίοδος. Η έκθεση του φιλμ στο φως ονομάζεται **φωτογραφική έκθεση** (ε) και ορίζεται ως το γινόμενο του μέσου φωτισμού (Β) του φιλμ επί το χρόνο (t) έκθεσης στο φως. Δηλαδή: φωτογραφική εκθεση=(μέσος φωτισμός)x(χρόνος έκθεσης) ή $\varepsilon = Bt$. Ο χρόνος έκθεσης για κάθε φιλμ καθορίζεται από την ευαισθησία του φιλμ και είναι σταθερός.

Τα μηχανικά συστήματα

(i) **Το κλείστρο** ή **εστιακός φωτοφράχτης**. Βρίσκεται ακριβώς μπροστά από το φιλμ. Αποτελείται από δύο μικρές «κουρτίνες», στερεωμένες σε καρούλια στα άκρα της πύλης πίσω από την οποία υπάρχει το φιλμ. Οι «κουρτίνες» είναι φτιαγμένες από υλικό αδιαπέραστο στο φως. Τυλίγονται και ξετυλίγονται με ελατήρια. Κατά τη διάρκεια της εστίασης η μία «κουρτίνα» σκεπάζει την πύλη, ενώ η άλλη είναι τυλιγμένη («οπλισμένη» φωτογραφική μηχανή).

Όταν πατηθεί το κουμπί για λήψη φωτογραφίας, ελευθερώνεται το κλείστρο, η «κουρτίνα» που καλύπτει την πύλη τυλίγεται γρήγορα στο καρούλι της και το φιλμ εκτίθεται στο φως. Μετά από προκαθορισμένο χρόνο η δεύτερη «κουρτίνα» ξετυλίγεται, καλύπτοντας την πύλη και διακόπτοντας την έκθεση του φιλμ στο φως.

Η καθιερωμένη κλίμακα έκθεσης του φιλμ στο φως είναι 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 125, 250, 500, 1000. Οι αριθμοί αυτοί είναι παρονομαστές κλασμάτων του δευτερόλεπτου. Έτσι, όταν τοποθετήσουμε το διακόπτη έκθεσης του φιλμ (αν τον διαθέτει η μηχανή μας) στην ένδειξη 250, τότε ο χρόνος έκθεσης του φιλμ θα είναι ίσος με 1/250s. Επίσης η μετάβαση από έναν αριθμό (π.χ. 250) στον αμέσως μικρότερο (125) συνεπάγεται και διπλασιασμό του χρόνου έκθεσης του φιλμ στο φως. Όταν το κλείστρο επιτρέπει το μέγιστο φωτισμό του φιλμ, κλείνει ένας διακόπτης με τον οποίο ενεργοποιείται το φλας, που μας επιτρέπει τη φωτογράφιση ακόμη και στο σκοτάδι.

(ii) **Ο μηχανισμός μετακίνησης του φιλμ** είναι χειροκίνητος ή ηλεκτροκίνητος. Αποτελείται από ένα καρούλι, που βρίσκεται μέσα σε ένα φωτοστεγανό κουτί, και από ένα μοχλό ή ένα μοτέρ. Με τη βοήθεια του μοτέρ προωθείται το φιλμ πίσω από την πύλη. Η προώθηση του φιλμ συνοδεύεται και από την επαναφορά του κλείστρου σε κατάσταση λήψης φωτογραφίας («οπλισμός»). Μετά τη λήψη όλων των φωτογραφιών που μας επιτρέπει το φιλμ, το επαναφέρουμε στο φωτοστεγανό κυλινδρικό κουτί του με το μηχανισμό μετακίνησής του.

Δεν πρέπει να παραλείψουμε να αναφέρουμε ότι στις ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές δεν υπάρχει φιλμ και η «πληροφορία - φωτογραφία» καταγράφεται στο μαγνητικό δίσκο της μηχανής, από όπου και «διαβάζεται» με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Στη συνέχεια, αφού υποστεί την επεξεργασία που επιθυμούμε, τυπώνεται.

4.4 ΦΩΤΟΣΤΟΙΧΕΙΑ

Οι ανάγκες της ανθρωπότητας για ενέργεια συνεχώς αυξάνουν. Όμως οι κύριοι φυσικοί πόροι ενέργειας, όπως το πετρέλαιο και το κάρβουνο, μειώνονται και σύντομα θα εξαντληθούν. Επίσης η μόλυνση που προκαλείται στο περιβάλλον από τη χρήση τους είναι μεγάλη. Η χρήση της πυρηνικής ενέργειας, όπως γίνεται μέχρι σήμερα, εγκυμονεί πολλούς κινδύνους και μολύνει ανεπανόρθωτα το περιβάλλον. Για τους παραπάνω λόγους η έρευνα στράφηκε στις ανεξάντλητες πηγές ενέργειας. Μία από αυτές τις πηγές είναι ο Ήλιος.

Η κατασκευή διατάξεων μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι πολύ μεγάλης σημασίας για την επίλυση του μελλοντικού ενεργειακού προβλήματος. Έτσι οι ερευνητές κατασκεύασαν τέτοιες διατάξεις, τα **φωτοστοιχεία**.

Τι είναι

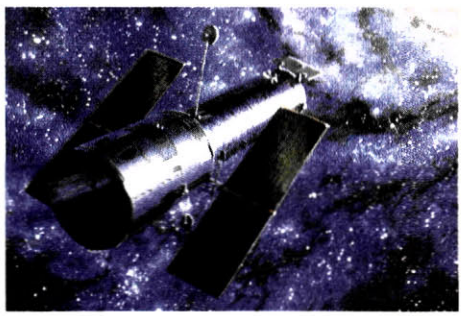
Τα φωτοστοιχεία ή φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι διατάξεις μετατροπής της ηλιακής - φωτεινής ενέργειας σε ηλεκτρική (σε ποσοστό μέχρι 20%). Η λειτουργία τους στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή το φαινόμενο κατά το οποίο, όταν πέφτει φως πάνω σε ορισμένα υλικά, τότε στα άκρα τους αναπτύσσεται τάση.

Στα φωτοστοιχεία γίνεται χρήση της ικανότητας των ημιαγωγών να επιτρέπουν τη μετακίνηση των ηλεκτρονίων προς μία κατεύθυνση.

Τα πρώτα φωτοστοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν σε πρακτικές εφαρμογές είχαν κατασκευαστεί από σελήνιο και οξείδια του χαλκού. Στη συνέχεια, και με την ανάπτυξη της τεχνολογίας στην επεξεργασία του πυριτίου, κατασκευάστηκαν φωτοστοιχεία από πυρίτιο, κυρίως για διαστημικές εφαρμογές.

Η προσπάθεια για μείωση του κόστους οδήγησε στην κατασκευή φθηνών φωτοστοιχείων πυριτίου. Η απόδοση όμως αυτών και η διάρκεια ζωής τους είναι μικρή. Τέτοια φωτοστοιχεία χρησιμοποιούνται σήμερα ως κύρια ή βοηθητική πηγή ενέργειας σε μικρές ηλεκτρονικές συσκευές, όπως λόγου χάρη στις φορητές αριθμομηχανές (κομπιουτεράκια).

Επίσης κατασκευάστηκαν φωτοστοιχεία μεγαλύτερης απόδοσης και διάρκειας ζωής από διάφορα υλικά.



4-37 Το τηλεσκόπιο Χαμπλ, το «ανθρώπινο μάτι» στο διάστημα. Διακρίνονται τα δύο μεγάλα φωτοβολταϊκά τόξα που το τροφοδοτούν με ενέργεια.

Πώς είναι

Ένα από τα πρώτα φωτοστοιχεία που κατασκευάστηκαν αποτελείται από μεταλλικό δίσκο πάνω στον οποίο υπάρχει λεπτή επίστρωση ημιαγώγιμου υλικού, π.χ. σεληνίου (Se). Η επίστρωση είναι τόσο λεπτή, ώστε να είναι διαπερατή από το φως.

Ένα φωτοστοιχείο πυριτίου έχει δύο στρώσεις πυριτίου, η καθεμία από τις οποίες έχει κάποια πρόσμειξη. Λόγου χάρη, η πρώτη στρώση έχει πρόσμειξη φωσφόρου (P) και είναι πολύ λεπτή, ενώ η άλλη στρώση είναι παχύτερη και έχει πρόσμειξη βαρίου (Ba).

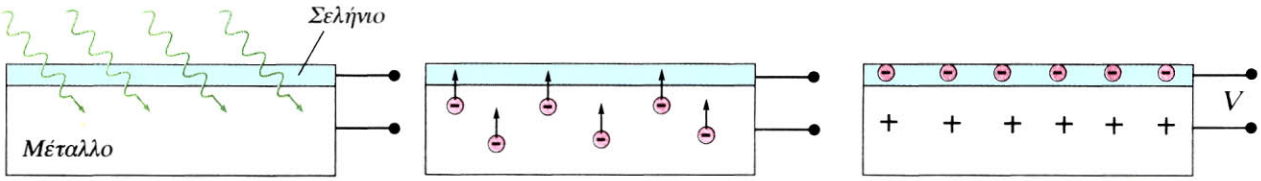
4-38 Αριθμομηχανή που λειτουργεί με φωτοστοιχεία.

Οι δύο στρώσεις είναι συσκευασμένες μέσα σε στεγανό πλαίσιο, ώστε να προστατεύονται από τη σκόνη, την υγρασία κτλ.

Η εξωτερική επιφάνεια του λεπτού στρώματος εκτίθεται στο ηλιακό φως. Για το λόγο αυτό η επιφάνεια του υλικού που την καλύπτει είναι αντιανακλαστική, για να μην ανακλάται το φως.

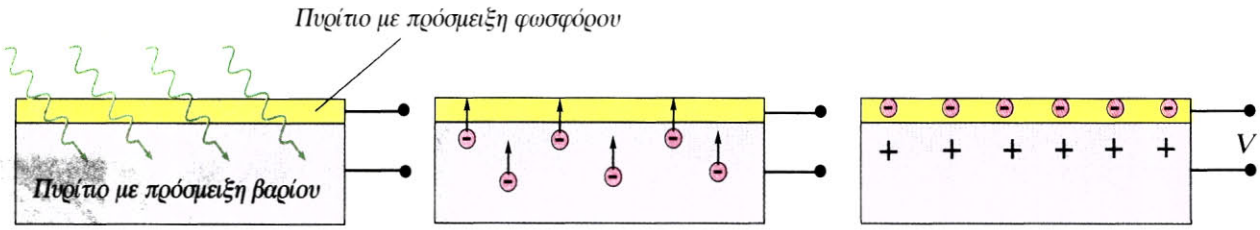
Πώς λειτουργούν

Φωτίζοντας ένα φωτοστοιχείο μετάλλου - ημιαγωγού, τα φωτόνια περνούν από το ημιαγώγιμο υλικό και φτάνουν στο μέταλλο. Από το μέταλλο αποσπώνται ηλεκτρόνια και διεισδύουν στο ημιαγώγιμο στρώμα. Έτσι το ημιαγώγιμο υλικό φορτίζεται αρνητικά, ενώ ο μεταλλικός δίσκος θετικά. Μεταξύ του αρνητικού στρώματος και του θετικού μεταλλικού δίσκου εμφανίζεται τάση.



4-39 *Σχηματική παράσταση της δημιουργίας τάσης στα άκρα ενός φωτοστοιχείου μετάλλου - σεληνίου (Se).*

Στα φωτοστοιχεία πυριτίου, όταν το φως προσπίπτει στην επιφάνειά τους, τα απορροφώμενα φωτόνια προκαλούν την εμφάνιση τάσης μεταξύ των δύο *στρώσεων* με παρόμοιο τρόπο. Η τάση μεταξύ των δύο στρώσεων κυμαίνεται από 0,5 έως περίπου 1Volt, ανάλογα με την ένταση του προσπίπτοντος φωτός.



4-40 *Σχηματική παράσταση της δημιουργίας τάσης στα άκρα ενός φωτοστοιχείου πυριτίου (Si).*

Συνδέοντας τη διάταξη με εξωτερικό κύκλωμα, αυτό διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, το φωτόρευμα, που αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την ένταση του φωτός.

Επειδή η μέγιστη ισχύς (P=VI) των φωτοστοιχείων είναι μικρή, για να δημιουργήσουμε μια πρακτικά χρήσιμη φωτοβολταϊκή γεννήτρια, συνδέουμε πολλά φωτοστοιχεία σε σειρά, παράλληλα ή μεικτά, ώστε τελικά η τάση και το ολικό ρεύμα να καλύπτουν τις εκάστοτε απαιτήσεις.

Οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες ονομάζονται και φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Στις εικόνες 4-41, 4-42 παρατηρούμε τέτοιες συστοιχίες που τροφοδοτούν μία κατοικία και ένα μύλο σε λούνα παρκ.

Εφαρμογές

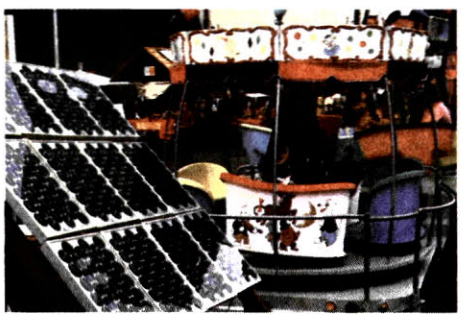
Η χρήση των φωτοβολταϊκών συστοιχιών πάνω στη Γη είναι μικρή και συνήθως περιορίζεται στην επαναφόρτιση συσσωρευτών που τροφοδοτούν σηματοδότες σιδηροδρόμων, φάρους, τηλεφωνικές γραμμές κτλ. Βέβαια υπάρχουν και μεγάλες συστοιχίες, που τροφοδοτούν εγκαταστάσεις άντλησης νερού και ύδρευσης, επιστημονικά εργαστήρια, κίνηση πρότυπων αυτοκινήτων και αεροσκαφών κτλ. Το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας αυτών είναι ακόμα πολύ μεγάλο, για να συναγωνιστούν τις συμβατικές πηγές ενέργειας (πετρελαίου, πυρηνικής ενέργειας κτλ.).

Η συνεχής μείωση του κόστους και η βελτίωση της τεχνολογίας κατασκευής τους ίσως βοηθήσει την ανθρωπότητα στην άντληση ενέργειας μόνο από τον Ήλιο με διάφορες τεχνικές μεθόδους.

Φανταστείτε την ηλιακή ενέργεια να συλλέγεται από τεράστιες φωτοβολταϊκές συστοιχίες, που θα είναι τοποθετημένες σε δορυφόρους, και να στέλνεται με μορφή ραδιοκυμάτων σε ειδικούς σταθμούς στη Γη. Έτσι η ανθρωπότητα θα εξασφαλίσει την απαιτούμενη ενέργεια από τον Ήλιο και τα οικολογικά προβλήματα (π.χ. φαινόμενο θερμοκηπίου, τρύπα του όζοντος κτλ.), που δημιουργούν οι ρυπογόνες βιομηχανίες, θα λυθούν.

Επίσης τα φωτοστοιχεία χρησιμοποιούνται στις κινηματογραφικές μηχανές προβολής για την παραγωγή ήχου. Όταν προβάλλεται μια κινηματογραφική ταινία, μια λεπτή δέσμη φωτός προσπίπτει κοντά στην άκρη του φιλμ. Στην περιοχή αυτή του φιλμ υπάρχει μια αλληλουχία διαφανών σχημάτων. Πίσω από το φιλμ υπάρχει ένα φωτοκύτταρο. Με το πέρασμα του φιλμ στη μηχανή προβολής τα διαφανή αυτά σχήματα διαφοροποιούν το ποσό του φωτός που προσπίπτει στο φωτοκύτταρο. Έτσι αυξομοιώνεται το φωτόρευμα. Στη συνέχεια άλλες συσκευές μετατρέπουν αυτές τις αυξομοιώσεις του ρεύματος σε ήχο.

4-41 Σύγχρονη κατοικία τροφοδοτείται με φωτοβολταϊκή συστοιχία.



4-42 Ο μύλος του λούνα παρκ λειτουργεί με ρεύμα που προέρχεται από φωτοβολταϊκή συστοιχία.

4-43 Φωτοβολταϊκό πάρκο στη Σητεία Κρήτης ισχύος 172kW.

Παροχή ενέργειας από τον Ήλιο για τη λειτουργία συσκευών σε διαστημικό όχημα.

4.5 LASER

Τι είναι

Τα lasers είναι διατάξεις παραγωγής (οπτικών) ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με τη μέθοδο της «εξαναγκασμένης εκπομπής ακτινοβολίας».

Η λέξη laser (λέιζερ) προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation» που στα ελληνικά σημαίνει «ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας». Όπως γίνεται λοιπόν αντιληπτό, το laser είναι ένας ενισχυτής φωτός.

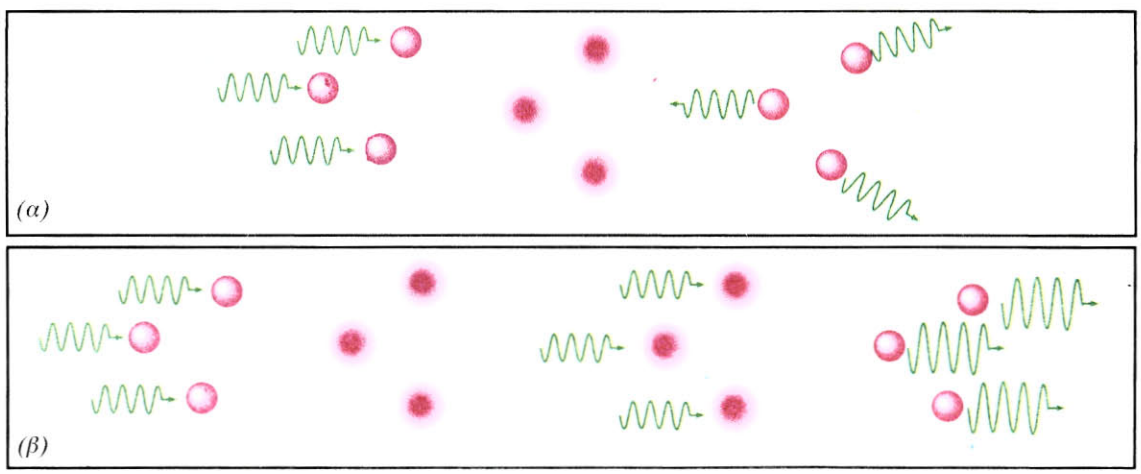
Ιστορικά αναφέρουμε ότι ο Albert Einstein είχε αποδείξει τη δυνατότητα ύπαρξης της «εξαναγκασμένης εκπομπής ακτινοβολίας» από το 1917.

Το 1958 υποδείχθηκε η αρχή λειτουργίας του laser από τους C.H. Towns (Τάουνς) και A.L. Schawlow (Σάλοου). Το 1960 κατασκευάστηκε από τον T.H. Maiman (Μέιμαν) το πρώτο laser ρουμπινιού (ρουβιδίου).

Τι είναι η «εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας»

Όπως είδαμε στους λαμπτήρες, στο πυρακτωμένο νήμα βολφραμίου τα ενεργειακά άλματα (αποδιεγέρσεις) των ατόμων γίνονται με τυχαίο τρόπο και σε τυχαίες χρονικές στιγμές. Αυτού του τύπου η αποδιέγερση και εκπομπή ακτινοβολίας χαρακτηρίζεται ως αυθόρμητη (σχήμα 4-44α).

Για να προκληθεί εξαναγκασμένη αποδιέγερση και εκπομπή ακτινοβολίας, πρέπει ένα διεγερμένο άτομο να «φωτιστεί» από φωτόνιο ενέργειας ίσης με την ενεργειακή διαφορά δύο ενεργειακών σταθμών. Τότε εκπέμπεται από το άτομο ένα φωτόνιο πανομοιότυπο με αυτό που του προκάλεσε την αποδιέγερση. Το φωτόνιο που προκάλεσε την αποδιέγερση και αυτό που εκπέμφθηκε κατά την αποδιέγερση προστίθενται και δημιουργούν κατά την έξοδό τους ακτινοβολία διπλάσιας έντασης από εκείνη που χρησιμοποιήθηκε για τη διέγερση (σχήμα 4-44β). Έτσι έχουμε ενίσχυση της ακτινοβολίας.

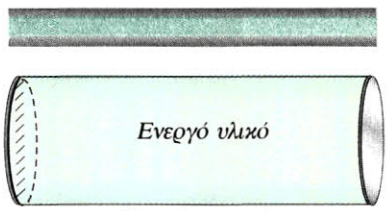


4-44 *Αλληλεπίδραση ατόμου - ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.*
(α) Διέγερση και αυθόρμητη εκπομπή.
(β) Διέγερση και εξαναγκασμένη εκπομπή.

Πώς είναι

Υπάρχουν πολλοί τύποι laser. Ο κάθε τύπος έχει δικά του χαρακτηριστικά και κατασκευαστικές λεπτομέρειες. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν ορισμένες βασικές αρχές στη λειτουργία τους, κοινές για όλους τους τύπους. Τα τμήματα που μπορούμε να διακρίνουμε σε μία διάταξη laser είναι:

- το ενεργό υλικό,
- το οπτικό αντηχείο ή κοιλότητα συντονισμού και
- το τμήμα διαδικασίας άντλησης.



4-45 *Σχηματική παράσταση μιας διάταξης laser.*

Πώς λειτουργούν

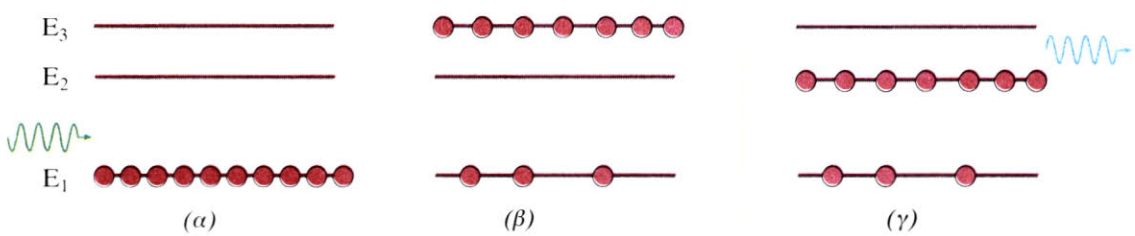
Με τη βοήθεια της διάταξης laser ρουβιδίου θα προσπαθήσουμε να κατανοήσουμε τον τρόπο λειτουργίας οποιασδήποτε διάταξης laser και το ρόλο κάθε τμήματός της.

Το ενεργό υλικό σ' αυτό τον τύπο laser είναι το ρουβίδιο (ρουμπίνι), δηλαδή το τριοξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3) με προσμείξεις χρωμίου. Οι ενεργειακές στάθμες του ρουβιδίου που προσφέρονται για την παραγωγή ακτίνων lasers είναι τρεις.

Σε συνηθισμένες συνθήκες τα περισσότερα άτομα βρίσκονται στη θεμελιώδη στάθμη (E_1). Φωτίζοντας το ρουμπίνι με πράσινο φως, τα ιόντα του διεγείρονται και ανέρχονται στη στάθμη E_3. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **άντληση** (σχήμα 4-46α, β). Στη στάθμη E_3 παραμένουν απειροελάχιστο χρόνο και μεταπίπτουν αυθόρμητα στην E_2, που είναι στάθμη χαμηλότερης ενέργειας. Η διάρκεια παραμονής τους στην E_2 είναι πολύ μεγαλύτερη από ό,τι στην E_3. Τέλος επιστρέφουν στη θεμελιώδη E_1.

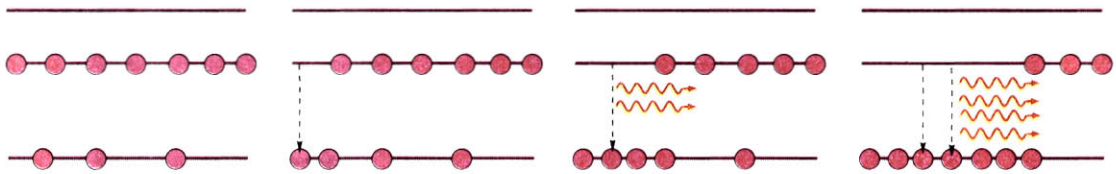
Η μεγάλη σχετικά διάρκεια παραμονής των ατόμων στην E_2 έχει ως αποτέλεσμα να βρίσκονται στην ενεργειακή αυτή κατάσταση περισσότερα άτομα από ό,τι στη θεμελιώδη. Η κατάσταση αυτή είναι αντίθετη από τη φυσιολογική, λέγεται **αντιστροφή πληθυσμών** (σχήμα 4-46γ) και συντηρείται με την αδιάκοπη άντληση από τη στάθμη E_0 στη στάθμη E_2.

4-46 *(α) , (β) Διαδικασία άντλησης και (γ) αντιστροφή πληθυσμών.*



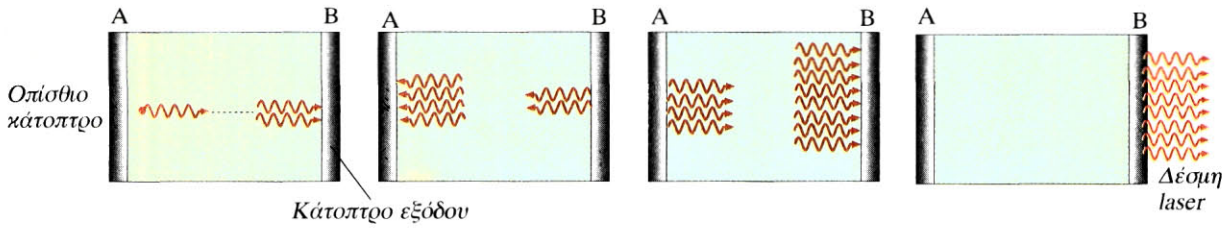
Όταν ένα άτομο μεταπίπτει από τη στάθμη E_2 στην E_1, εκπέμπει φωτόνιο συχνότητας $f=(E_2-E_1)/h$. Το φωτόνιο αυτό στην πορεία του συγκρούεται με ένα άλλο άτομο, που βρίσκεται στη στάθμη E_2. Το άτομο αυτό με τη σειρά του εκπέμπει ένα πανομοιότυπο φωτόνιο και μεταπίπτει στη θεμελιώδη στάθμη E_1. Τα δύο φωτόνια τώρα συγκρούονται με άλλα δύο άτομα, οπότε εκπέμπονται νέα φωτόνια κ.ο.κ.

Η διαδικασία λοιπόν αποδιέγερσης από τη στάθμη E_2 στη στάθμη E_1 μοιάζει με χιονοστιβάδα και η ενέργεια που χάνουν τα άτομα μεταφέρεται από το εκπεμπόμενο φως. Από τις ακτίνες αυτού του φωτός άλλες ακολουθούν πορεία κατά μήκος της ράβδου ρουβιδίου και άλλες όχι, βγαίνοντας τελικά από τη ράβδο.



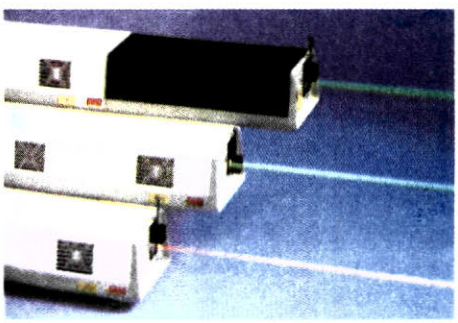
4-47 *Σχηματική παράσταση εξαναγκασμένης αποδιέγερσης και δημιουργίας φωτός laser.*

Η ράβδος ρουβιδίου τοποθετείται μεταξύ δύο επίπεδων κατόπτρων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4-48. Η επιλογή των επίπεδων κατόπτρων είναι τέτοια, ώστε το οπίσθιο (A) να αντανακλά όλα τα φωτόνια, ενώ το εμπρόσθιο (B) (κάτοπτρο εξόδου) να είναι ημιπερατό και να επιτρέπει την έξοδο ενός ποσοστού φωτονίων. Το σύστημα των δύο αυτών κατόπτρων ονομάζεται **οπτικό αντηχείο**.



4-48 *Σχηματική παράσταση της διαδικασίας παραγωγής φωτός laser.*

Οι ακτίνες που ακολουθούν πορεία κατά μήκος της ράβδου, φτάνοντας στο κάτοπτρο B, ανακλώνται και γυρίζουν πίσω. Στο δρόμο τους αποδιεγείρουν και άλλα άτομα και η δέσμη τους γίνεται πιο ισχυρή. Φτάνοντας στο κάτοπτρο A ανακλώνται και, ακολουθώντας πορεία προς το κάτοπτρο B, αποδιεγείρουν στο δρόμο τους πολλαπλάσια άτομα. Έτσι η ισχύς της δέσμης μεγαλώνει τόσο, ώστε ένα μέρος της καταφέρνει να διαπεράσει το ημιδιαφανές κάτοπτρο (B). Η δέσμη του φωτός που εξέρχεται από το κάτοπτρο (B) είναι το **φως laser** (σχήμα 4-48).



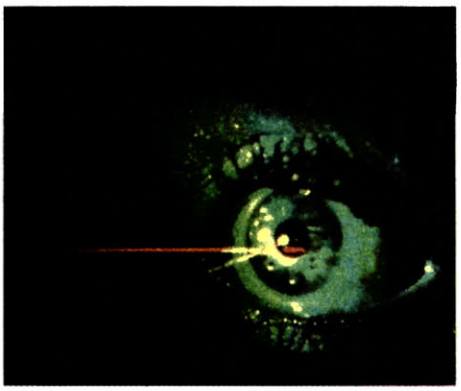
4-49 *Εργαστηριακά «κανόνια» lasers με διαφορετικά χρώματα.*

Χαρακτηριστικά του φωτός laser

Το φως laser που εκπέμπεται έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά, που το διαφοροποιούν από το φως άλλων φωτεινών πηγών:

- **Κατευθυντικότητα**. Η δέσμη φωτός είναι πολύ λεπτή και μένει παράλληλη, ακόμα και αν ταξιδέψει μεγάλες αποστάσεις, όπως από τη Γη στη Σελήνη.

- **Μονοχρωματικότητα**. Το φως που εκπέμπεται από μία πηγή laser έχει μια συγκεκριμένη συχνότητα (χρώμα).
- **Λαμπρότητα**. Η δέσμη laser συγκεντρώνει μεγάλη οπτική ισχύ και, επειδή είναι πολύ λεπτή, είναι χιλιάδες φορές λαμπρότερη από τον Ήλιο. Γι' αυτό το λόγο δεν πρέπει να κατευθύνεται η δέσμη στα μάτια.
- **Συμφωνία φάσης**. Το φωτόνιο που προκαλεί την αποδιέγερση αναδύεται μαζί με το φωτόνιο που εκπέμπεται. Αυτό συμβαίνει σε όλες τις διαδοχικές αποδιεγέρσεις.
- **Εστίαση**. Επειδή έχει μεγάλη κατευθυντικότητα και είναι μονοχρωματική, μπορεί να εστιαστεί με κατάλληλους φακούς.



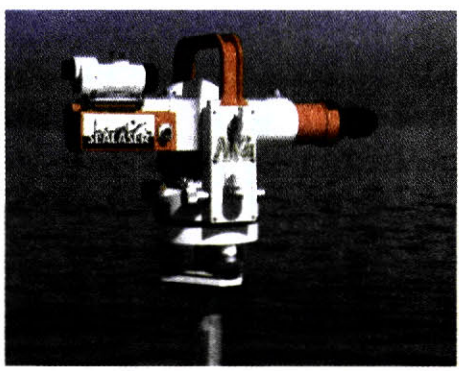
4-50 Εγχείρηση ματιού με τη βοήθεια νυστεριού laser.

Εφαρμογές

Ο κατάλογος εφαρμογών των lasers είναι μεγάλος και εμπλουτίζεται με εντυπωσιακή ταχύτητα. Παρακάτω αναφέρονται μερικές από αυτές:

- **Μέτρηση αποστάσεων**. Με τη βοήθεια του laser μετράμε αποστάσεις πολύ μεγάλες (Γη - Σελήνη, διάμετρος Γης, μέγεθος ενός αστεριού) ή πολύ μικρές (μέγεθος ατόμου) κτλ.
- **Στη βιομηχανία**. Χρησιμοποιούνται ως εργαλεία κοπής και διάτρησης εξαιρετικής λεπτότητας για πολύ σκληρά υλικά, όπως ο χάλυβας και τα διαμάντια, αλλά και στη συγκόλληση.
- **Στην Ιατρική**. Οι γιατροί χρησιμοποιούν νυστέρια lasers στις «λεπτές» εγχειρήσεις (συγκόλληση αμφιβληστροειδούς, πλαστική χειρουργική κτλ.). Η λεπτή δέσμη laser παρέχει μεγάλη ακρίβεια στη χρήση και επιτρέπει αναίμακτες τομές. Επίσης χρησιμοποιούν το laser στα ενδοσκόπια, στη φωτοθεραπεία αλλά και για την απαλλαγή των δοντιών από την «πέτρα».
- **Στην πυρηνική σύντηξη**. Η μελλοντική κατασκευή των lasers σύντηξης, που θα προκαλέσουν την πυρηνική σύντηξη ελαφρών στοιχείων, όπως το δευτέριο και το τρίτιο (ισότοπα του υδρογόνου), θα απαλλάξει την ανθρωπότητα από τα πυρηνικά απόβλητα και τον κίνδυνο πυρηνικού ατυχήματος στα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Στη στρατιωτική τεχνολογία**. Χρησιμοποιούνται για σκόπευση, καταστροφή στόχων, καθοδήγηση βλημάτων κτλ.
- **Στη μουσική και στην τηλεόραση**. Εγγράφουν και παίζουν μουσική (CD) και προγράμματα βίντεο.
- **Στις τηλεπικοινωνίες**. Η δέσμη laser παρουσιάζει μια ξεχωριστή ικανότητα να μεταφέρει μεγάλο πλήθος πληροφοριών.
- **Στην οπτική ολογραφία**. Με τη βοήθεια των lasers επιτυγχάνουμε τρισδιάστατη απεικόνιση αντικειμένων σε φωτοευαίσθητες επιφάνειες ειδικών φιλμς.

4-51 Με τη βοήθεια lasers οι μηχανές των καταστημάτων «διαβάζουν» τις τιμές των εμπορευμάτων.



4-52 Συσκευή μέτρησης αποστάσεων με ακτίνες lasers.

ΣΥΝΟΨΗ 4ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

❑ Η φωτοβολία των φωτεινών πηγών οφείλεται στην αποδιέγερση ατόμων που έχουν διεγερθεί με διάφορους τρόπους.

❑ Οι λαμπτήρες αλογόνου είναι λαμπτήρες πυρακτώσεως με τη διαφορά ότι το γυάλινο περίβλημα είναι από χαλαζία και το εσωτερικό τους γεμίζεται όχι μόνο με αδρανές αέριο αλλά και με μικρή ποσότητα ατμών ιωδίου.

❑ Οι οπτικές ίνες είναι πολύ λεπτές, κυλινδρικές, από γυαλί ή πλαστικό μεγάλης καθαρότητας. Με τη βοήθεια αυτών μπορούμε να «οδηγήσουμε» το φως από μία ακίνητη πηγή σε οποιοδήποτε σημείο θέλουμε.

❑ Με τη βοήθεια καλωδίων οπτικών ινών, πολύ μικρότερου βάρους και διαμέτρου των αντίστοιχων του χαλκού, μπορούμε να μεταφέρουμε μεγάλο «όγκο» πληροφοριών χωρίς παράσιτα, συνακροάσεις και κίνδυνο υποκλοπών.

❑ Η φωτογραφική μηχανή είναι ένας σκοτεινός θάλαμος που έχει όλα εκείνα τα οπτικά και μηχανικά συστήματα για την εύκολη λήψη φωτογραφιών.

❑ Τα φωτοστοιχεία ή φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι διατάξεις μετατροπής της ηλιακής - φωτεινής ενέργειας σε ηλεκτρική.

❑ Τα lasers είναι ενισχυτές φωτός και η λειτουργία τους βασίζεται στην εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας.

ΚΥΡΙΟΙ ΟΡΟΙ

- Λαμπτήρας πυρακτώσεως
- Λαμπτήρας φθορισμού
- Φθορισμός
- Οπτικές ίνες
- Ψηφιακή (digital) εκπομπή
- Φωτοστοιχεία
- Φωτοβολταϊκές γεννήτριες
- Laser
- Εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας
- Άντληση
- Αντιστροφή πληθυσμών

ΟΠΤΙΚΗ ΟΛΟΓΡΑΦΙΑ

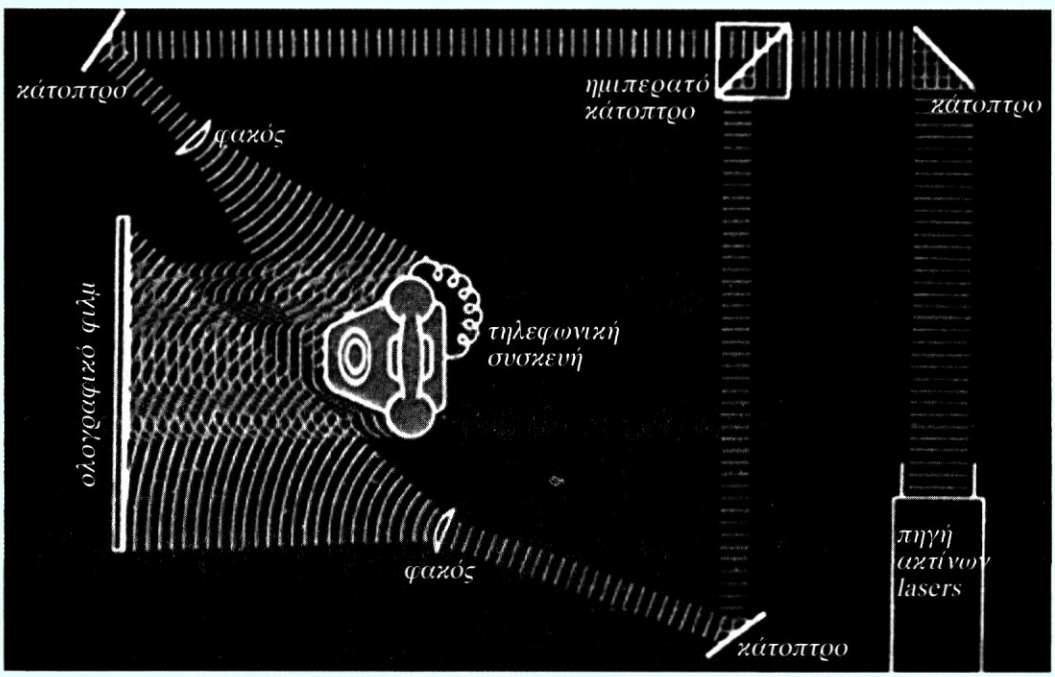
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οπτική ολογραφία είναι η τεχνική της τρισδιάστατης απεικόνισης αντικειμένων σε φωτοευαίσθητες επιφάνειες ειδικών φιλμς. Η τεχνική αυτή αξιοποιεί τα φαινόμενα της συμβολής και περίθλασης του φωτός. Ο Denis Gabor είναι αυτός που πρώτος, το 1947, επινόησε τη θεωρητική αρχή της μεθόδου, αν και η ουσιαστική ανάπτυξη της ολογραφίας πραγματοποιήθηκε τη δεκαετία του 1960, μετά το σχεδιασμό και την επιτυχή κατασκευή των πρώτων Lasers. Οι απεικονίσεις αυτές -που καλούνται ολογράμματα- έχουν ένα μοναδικό χαρακτηριστικό: παρουσιάζουν και τις τρεις διαστάσεις του αντικειμένου, ενώ ταυτόχρονα διαθέτουν το φαινόμενο της παράλλαξης. Αυτό σημαίνει ότι, καθώς ο παρατηρητής ενός ολογράμματος μετακινεί δεξιά - αριστερά το κεφάλι του, αλλάζοντας έτσι τη γωνία θέασης, βλέπει διαφορετικές όψεις του ίδιου αντικειμένου που ολογραφήθηκε. Η διαδικασία αυτή θυμίζει την αντίληψη που αποκτά ο προηγούμενος παρατηρητής σαν να έβλεπε «ζωντανό» το πραγματικό αντικείμενο μέσα από το άνοιγμα ενός «παράθυρου» με διαστάσεις αυτές του φιλμ. Η μοναδική αυτή ιδιότητα των ολογραμμάτων τα κάνει να θυμίζουν στερεοσκοπικές φωτογραφίες, αν και η αίσθηση της παρατήρησης ενός ολογράμματος είναι ασύγκριτα καλύτερη από αυτήν της στερεοσκοπικής φωτογραφίας.

ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΟΛΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ - ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ

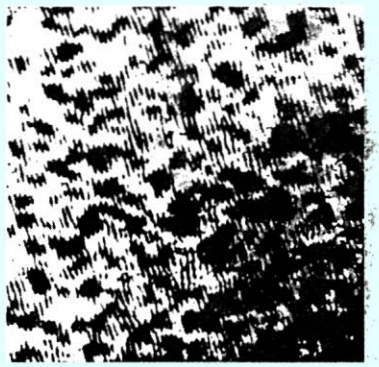
Η ολογραφία, αν και χρησιμοποιεί -όπως άλλωστε και η φωτογραφία- το ανακλώμενο από το αντικείμενο φως που προσπίπτει στο ολογραφικό φιλμ, εντούτοις είναι μια μέθοδος απεικόνισης ουσιαστικά διαφορετική από τη φωτογράφιση. Το ολογραφικό φιλμ καταγράφει όχι μόνο την κατανομή της έντασης του ανακλώμενου φωτός αλλά και την αντίστοιχη κατανομή της φάσης. Η επιπλέον αυτή δυνατότητα της διάκρισης των κυμάτων που έχουν διαφορετικές φάσεις προκύπτει από την εσκεμμένη παρουσία μιας αδιατάρακτης δέσμης «κυμάτων αναφοράς», που συμβάλλουν με τα ανακλώμενα κύματα στο επίπεδο του φιλμ. Έτσι σε μια διάταξη που παράγει ένα ολόγραμμα το αντικείμενο φωτίζεται από το σύμφωνο, μονοχρωματικό φως ενός Laser. Το αντικείμενο ανακλά το φως και μάλιστα τα δημιουργούμενα μέτωπα κύματος έχουν τη μορφή της εξωτερικής του επιφάνειας.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται διαγραμματικά η οπτική διάταξη που χρησιμοποιείται για τη λήψη ενός ολογράμματος αντικειμένου (τηλεφωνική συσκευή). Στη διάταξη αυτή φαίνονται καθαρά οι πορείες των δύο φωτεινών δεσμών του Laser, όπως επίσης και η περιοχή συνάντησης των μετώπων κύματος στην επιφάνεια του ολογραφικού φιλμ στο αριστερά κάτω άκρο του σχήματος.



Αυτά τα μέτωπα κύματος συμβάλλουν με τα αντίστοιχα της δέσμης αναφοράς και έτσι δημιουργείται στο φιλμ ένας σύνθετος σχηματισμός άσπρων και μαύρων λεπτών γραμμών, που ονομάζονται κροσσοί συμβολής και δε θυμίζουν σε τίποτα το αντικείμενο που ολογραφήθηκε. Στο διάγραμμα συμβολής που

αποτυπώθηκε στο φιλμ γίνεται χημική επεξεργασία και έτσι δημιουργείται αυτό που ονομάζεται διαπερατό ολόγραμμα. Ο φωτισμός του διαπερατού ολογράμματος με τη δέσμη του προηγούμενου Laser δημιουργεί στο χώρο ένα πιστό είδωλο του αντικειμένου. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η φωτογραφία των κροσσών ενός διαπερατού ολογράμματος, όπως επίσης και το στιγμότυπο όπου το διαπερατό αυτό ολόγραμμα φωτίζεται και δημιουργεί στο χώρο το φανταστικό είδωλο του αντικειμένου που είχε ολογραφηθεί.



Εκτός όμως από τα διαπερατά ολογράμματα η ολογραφία έχει να επιδείξει και άλλους τύπους ολογραμμάτων, όπως τα ανακλαστικά, τα ολογράμματα ουράνιου τόξου και τα ολογράμματα κίνησης. Το μεγάλο προσόν των ανακλαστικών ολογραμμάτων είναι ότι αυτά γίνονται ορατά με το φωτισμό τους από τον Ήλιο ή από κοινή, συμβατική λάμπα ισχυρού φωτισμού. Δεν ισχύει δηλαδή ο περιορισμός ότι το φως κατά τη στιγμή της επαναδημιουργίας των μετώπων κύματος πρέπει να είναι το ίδιο ακριβώς με αυτό που φώτισε το αντικείμενο κατά τη στιγμή της δημιουργίας του ολογράμματος. Τα ολογράμματα ουράνιου τόξου είναι αυτά που στη θεώρησή τους παρουσιάζουν όλα σχεδόν τα χρώματα του ουράνιου τόξου ανάλογα με τη γωνία παρατήρησης. Οι πιστωτικές κάρτες, οι συσκευασίες μερικών τροφίμων, οι ταινίες γνησιότητας σε κασέτες ή CD είναι μερικές μόνο περιπτώσεις όπου τα ολογράμματα ουράνιου τόξου κάνουν αισθητή την παρουσία τους καθημερινά. Τέλος τα ολογράμματα κίνησης είναι αυτά που, πέρα από τον τρισδιάστατο χαρακτήρα ενός αντικειμένου, εμφανίζουν και την κίνηση που είχε το αντικείμενο κατά τη στιγμή της ολογράφησης. Βέβαια τα ολογράμματα της κατηγορίας αυτής προϋποθέτουν εργαστήρια με συσκευές Lasers ειδικού τύπου, όπως και οπτικές διατάξεις με αυξημένες απαιτήσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι κατηγορίες των ολογραμμάτων δεν εξαντλούνται σε αυτές που ήδη αναφέρθηκαν. Σχεδόν καθημερινά η επιστημονική κοινότητα ενημερώνεται για τις νέες εξελίξεις σε αυτό τον τομέα, που προέρχονται είτε από Lasers τελευταίας γενιάς είτε από ολογραφικά φιλμς καλύτερων προδιαγραφών ή ακόμη και από τη συνδυαστική δράση παράλληλων τεχνικών απεικόνισης, όπως αυτή της ολογραφίας με 3D γραφικά των ηλεκτρονικών υπολογιστών κ.ά.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η ολογραφία, ως μια τεχνική παραγωγής τρισδιάστατων εικόνων, δεν μπορεί προς το παρόν να αντιμετωπίσει την παραδοσιακή φωτογραφία λόγω του υψηλού της κόστους. Όμως αυτό που την κάνει ασύγκριτα πιο ενδιαφέρουσα είναι οι πολλά υποσχόμενες εφαρμογές της. Η συνοπτική ομαδοποίηση των εφαρμογών που ήδη χρησιμοποιούνται παγκόσμια με τη μέθοδο της ολογραφίας αποφέρει τις εξής πέντε, πολύ γενικές, κατευθύνσεις:

Ολογράμματα επιδείξεων: Πρόκειται για ολογράμματα συγκεκριμένων αντικειμένων, όπως για παράδειγμα μουσειακά είδη ή σπάνια, μοναδικά αντικείμενα μεγάλης αξίας. Η ολογράφησή τους μας δίνει την δυνατότητα της επαναληπτικής παρουσίασής τους χωρίς τους κινδύνους που συνεπάγεται μια τέτοια διαδικασία. Ας φανταστούμε, για παράδειγμα, την ολογράφηση ενός μοναδικού αγάλματος (π.χ. της Pieta του Μικελάντζελο) και την αποστολή των συγκεκριμένων ολογραμμάτων σε άλλα μουσεία του κόσμου στα πλαίσια πολιτιστικών ανταλλαγών. Με αυτό τον τρόπο θα μπορούν οι επισκέπτες μουσείων που βρίσκονται σε διαφορετικά σημεία της Γης να απολαμβάνουν την ίδια στιγμή μοναδικά αντικείμενα τέχνης με κάθε λεπτομέρεια και σε τρισδιάστατη απεικόνιση.

Ολογραφικά οπτικά στοιχεία: Με τη βοήθεια της ολογραφίας δημιουργούνται ολογραφικοί φακοί, κάτοπτρα για τις νέες «έξυπνες» οθόνες πολλαπλής ανάγνωσης (head up display). Πράγματι, οι πιλότοι σήμερα μπορούν να ενημερώνονται για την κατάσταση του αεροσκάφους γρήγορα και αξιόπιστα μέσω της παρατήρησης σε τέτοιες οθόνες, που απεικονίζουν κάθε στιγμή τα όργανα ελέγχου και λειτουργίας του αεροσκάφους.

Ολόγραμμα σαν πιστοποιητικό γνησιότητας: Η πιστή αντιγραφή ενός ολογράμματος είναι πρακτικά αδύνατη, έτσι ακόμη και σήμερα πιστωτικές κάρτες, διπλώματα οδήγησης αλλά και συσκευασίες φαρμάκων και τροφίμων διαθέτουν ολογράμματα εξασφαλίζοντας έτσι τη γνησιότητά τους.

Ολογραφικός μη καταστροφικός έλεγχος: Πρόκειται για μια μέθοδο που μελετά την αντοχή των υλικών στις παραμορφώσεις, ελέγχει την ανομοιογένεια των σωμάτων, ενώ μπορεί να προβλέψει με απόλυτη ακρίβεια τα ευπαθή σημεία ενός υλικού ή μιας κατασκευής. Για παράδειγμα, αναφέρεται ότι όλες σχεδόν οι εταιρείες ελαστικών αυτοκινήτου, προτού κυκλοφορήσουν ένα καινούριο μοντέλο τους στην αγορά το ελέγχουν με τη βοήθεια της ολογραφικής συμβολομετρίας. Ο έλεγχος γίνεται σε κατάλληλα διαμορφωμένη ολογραφική τράπεζα, όπου το ελαστικό υφίσταται διπλή έκθεση από το μονοχρωματικό φως ενός Laser και έτσι δημιουργείται ένα διάγραμμα κροσσών συμβολής. Στο διάγραμμα αυτό ο τρόπος κατανομής των κροσσών και κυρίως η πυκνότητά τους σε διάφορες περιοχές του ελαστικού προσδιορίζουν τα πιθανά σημεία όπου το ελαστικό πρόκειται «να ανοίξει». Διαπιστώνει λοιπόν κανείς ότι με την ολογραφική συμβολομετρία γίνεται μια πρόγνωση στο μέλλον. Βέβαια, εάν ο κατασκευαστής φροντίσει τα ευπαθή σημεία του ελαστικού που προσδιορίστηκαν ολογραφικά, τότε θα έχει εξασφαλίσει μεγαλύτερο χρόνο ζωής για το προϊόν του. Παρόμοια αναφορά μπορεί κανείς να κάνει για την εφαρμογή της συγκεκριμένης ολογραφικής τεχνικής στη συντήρηση έργων τέχνης (π.χ. παλαιές εικόνες ή πίνακες ζωγραφικής), όπου η πυκνότητα των κροσσών σε περιοχές της επιφάνειας του έργου τέχνης προδίδουν τα σημεία που ο ειδικευμένος συντηρητής θα πρέπει πρώτα να φροντίσει, εάν θέλει να αποκαταστήσει τη βλάβη, η οποία μάλιστα δεν έχει κάνει ορατά τα σημάδια της παρουσίας της στην προς μελέτη επιφάνεια. Είναι κατανοητή η ωφελιμότητα ενός τέτοιου ελέγχου, στο μέτρο που όλες αυτές οι διαπιστώσεις γίνονται με εντελώς ανώδυνο για το αντικείμενο τρόπο. Το έργο τέχνης δηλαδή δεν υφίσταται καμία φθορά από μηχανική επαφή με κάποια συσκευή, απλώς γίνεται αντικείμενο κατάλληλου φωτισμού από το φως ενός Laser.

Ολογραφία κίνησης: Δίνεται η δυνατότητα μελέτης της ροής ρευστών, αερίων, όπως και ο ακριβής έλεγχος των διαρροών. Σε αυτή την κατηγορία των εφαρμογών εμπεριέχονται και οι περιπτώσεις των ολογραφικών πορτρέτων με τεράστια σημασία όχι μόνο από καλλιτεχνική άποψη αλλά και σε ιατρικές εφαρμογές (πλαστική χειρουργική).

Όπως έγινε κατανοητό από την περιληπτική αναφορά στην οπτική ολογραφία, φαίνεται πως, αν και η τεχνική αυτή έχει σύντομο σχετικά παρελθόν, προβλέπεται να έχει μεγάλης διάρκειας μέλλον. Ο ολογραφικός κινηματογράφος, η ολογραφική κάμερα και η ολογραφική τηλεόραση είναι επιτεύγματα που δε θα αργήσουν να «επισκεφθούν» το ευρύ καταναλωτικό κοινό. Η πληροφορική θα βρει σύντομα τον τρόπο να μεταφέρει την τρισδιάσταση ολογραφική εικόνα σε σπίτια και γραφεία, έτσι ώστε η έννοια της επικοινωνίας να αποκτήσει έναν άλλο, ουσιαστικά διαφορετικό χαρακτήρα από το σημερινό. Όλα τα ανωτέρω είναι αποτελέσματα της διαπίστωσης ότι η μακροχρόνια επιθυμία του ανθρώπου να παγιδεύσει την τρίτη διάσταση της πραγματικότητας είναι πλέον γεγονός.

Κείμενο του Αθ. Αραβαντινού δρ. Φυσικής

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Ποιες είναι οι κατηγορίες των φωτεινών πηγών; Πού οφείλεται η φωτοβολία τους;

2. Γιατί αντικαθιστούμε τον ατμοσφαιρικό αέρα στο εσωτερικό του γυάλινου περιβλήματος των λαμπτήρων πυρακτώσεως με αδρανές αέριο;

3. Να περιγράψετε τον τρόπο εκπομπής φωτός από το λαμπτήρα πυρακτώσεως.

4. Όταν ρευματοδοτούμε ένα λαμπτήρα πυρακτώσεως με τάση μικρότερη της τάσης κανονικής λειτουργίας, ο λαμπτήρας κοκκινίζει. Πώς εξηγείται αυτό;

5. Στους λαμπτήρες φθορισμού εκπέμπεται ορατό φως:
(α) κατευθείαν από τα ηλεκτρόδια
(β) από τα ηλεκτρόδια και τη φθορίζουσα ουσία
(γ) μόνο από τη φθορίζουσα ουσία
(δ) από τους ατμούς υδραργύρου
Ποια από τις παραπάνω προτάσεις είναι σωστή;

6. Ποιος είναι ο ρόλος του ιωδίου στους λαμπτήρες αλογόνου; Να γίνει πλήρης περιγραφή της δράσης του.

7. Να περιγραφεί ο τρόπος με τον οποίο εκπέμπεται ορατό φως από το λαμπτήρα φθορισμού.

8. Σε πολλά κέντρα διασκέδασης χρησιμοποιούν λαμπτήρες όμοιους με τους λαμπτήρες φθορισμού αλλά χωρίς φθορίζουσα επίστρωση. Όταν οι λαμπτήρες αυτοί είναι αναμμένοι, τότε τα δόντια μας και κάποια ρούχα μας (ειδικά τα λευκά) φωτοβολούν έντονα. Συζητήστε αυτό το φαινόμενο στην τάξη.

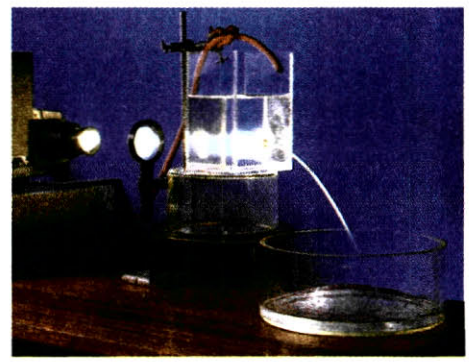
9. Τι είναι οι οπτικές ίνες και τι μπορούμε να πετύχουμε με αυτές;

10. Από ποια μέρη αποτελείται μία οπτική ίνα και ποιος είναι ο ρόλος καθενός;

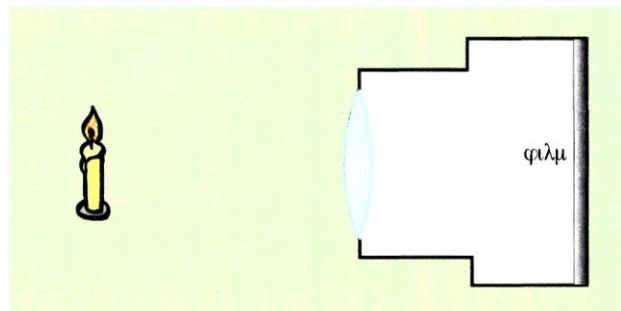
11. Πού οφείλεται η εξασθένηση του φωτός κατά την πορεία του μέσα σε μία οπτική ίνα;

12. Να αναφέρετε πέντε τουλάχιστον λόγους για τους οποίους οι οπτικές ίνες αντικατέστησαν τα καλώδια χαλκού στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών.

13. Στην παρακάτω εικόνα να εξηγήσετε γιατί το φως ακολουθεί την πορεία της φλέβας του νερού.



14. Να σχεδιάσετε την πορεία των ακτίνων και την αποτύπωση του ειδώλου στο φιλμ της φωτογραφικής μηχανής του σχήματος.



15. Φωτοβολταϊκά στοιχεία ή φωτοστοιχεία είναι:
(α) διατάξεις που μετατρέπουν ένα μέρος της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική
(β) διατάξεις που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε φωτεινή
(γ) διατάξεις που ενισχύουν το φως
(δ) διατάξεις που μετατρέπουν τη θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική
Ποια από τις παραπάνω προτάσεις είναι σωστή;

16. Σχεδιάστε ένα φωτοστοιχείο μετάλλου - Se. Περιγράψτε τον τρόπο ανάπτυξης τάσης στο φωτοστοιχείο αυτό.

17. Η αναπτυσσόμενη τάση στα άκρα ενός φωτοστοιχείου είναι:
(α) τουλάχιστον 10V
(β) όποια επιθυμούμε (γίνεται κατάλληλη ρύθμιση)
(γ) της τάξης των 0,5V
(δ) σίγουρα 1,5V, όπως και των ηλεκτρικών μπαταριών
Ποια από τις παραπάνω προτάσεις είναι σωστή;

18. Με τον όρο φωτόρευμα εννοούμε:
(α) τη ροή φωτός
(β) το ηλιακό φως
(γ) το ρεύμα που διαρρέει ένα κύκλωμα που τροφοδοτείται από φωτοστοιχείο ή φωτοβολταϊκή γεννήτρια
(δ) το φως που εκπέμπεται από σώματα, όταν αυτά διαρρέονται από ρεύματα
Ποια από τις παραπάνω προτάσεις είναι σωστή;

19. Το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει ένα ηλεκτρικό κύκλωμα τροφοδοτούμενο από φωτοβολταϊκή γεννήτρια:
(α) είναι πάντα σταθερό, ανεξάρτητο από την ένταση του φωτός που πέφτει στη φωτοβολταϊκή γεννήτρια
(β) εξαρτάται από το αν το φως προέρχεται από τον Ήλιο ή άλλη πηγή και όχι από την έντασή του
(γ) αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την ένταση του φωτός που πέφτει στη φωτοβολταϊκή γεννήτρια
(δ) είναι ανάλογο της τρίτης δύναμης της έντασης του φωτός που πέφτει στη φωτοβολταϊκή γεννήτρια
Ποια από τις παραπάνω προτάσεις είναι σωστή;

20. Περιγράψτε το μελλοντικό φανταστικό σενάριο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μόνο από τον Ήλιο.

21. Με μια διάταξη laser συμβαίνει:
(α) παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος
(β) παραγωγή φωτός
(γ) ενίσχυση φωτός
(δ) αλλαγή της συχνότητας μιας ακτινοβολίας
Σημειώστε για κάθε πρόταση ένα Σ ή Λ, αν είναι σωστή ή λάθος αντίστοιχα.

22. Περιγράψτε τον τρόπο εκπομπής φωτός με εξαναγκασμένη αποδιέγερση.

23. Να αναφέρετε τα τμήματα μιας διάταξης laser.

24. Πότε μια εκπομπή ακτινοβολίας χαρακτηρίζεται ως αυθόρμητη και πότε ως εξαναγκασμένη; Να αναφέρετε μια πηγή ακτινοβολίας για κάθε περίπτωση.

25. Εξηγήστε τον τρόπο λειτουργίας της διάταξης laser ρουβιδίου.

26. Αντιστοιχίστε τα παρακάτω:

	α. Μετατροπέας χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική
Α. Λαμπτήρας	
	β. Μετατροπέας ηλεκτρικής ενέργειας σε φως
Β. Laser	
Γ. Φωτοστοιχείο	γ. Μετατροπέας φωτεινής ενέργειας σε ηλεκτρική
	δ. Ενισχυτής φωτός

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Ποιες είναι οι κατηγορίες των φωτεινών πηγών; Πού οφείλεται η φωτοβολία τους;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 101

2. Γιατί αντικαθιστούμε τον ατμοσφαιρικό αέρα στο εσωτερικό του γυάλινου περιβλήματος των λαμπτήρων πυρακτώσεως με αδρανές αέριο;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 102

3. Να περιγράψετε τον τρόπο εκπομπής φωτός από το λαμπτήρα πυρακτώσεως.

Απάντηση: Βλ. σελίδα 103

4. Όταν ρευματοδοτούμε ένα λαμπτήρα πυρακτώσεως με τάση μικρότερη της τάσης κανονικής λειτουργίας, ο λαμπτήρας κοκκινίζει. Πώς εξηγείται αυτό;

Απάντηση:

Σ' αυτή την περίπτωση τα άτομα του βολφραμίου διεγείρονται σε στάθμες μικρότερης ενέργειας από αυτές που διεγείρονται, όταν αυτός λειτουργεί κανονικά. Κατά την αποδιέγερσή τους εκπέμπονται φωτόνια με ενέργεια που αντιστοιχεί σε συχνότητες στην περιοχή του ερυθρού και του υπερύθρου.

5. Στους λαμπτήρες φθορισμού εκπέμπεται ορατό φως:
(α) κατευθείαν από τα ηλεκτρόδια
(β) από τα ηλεκτρόδια και τη φθορίζουσα ουσία
(γ) μόνο από τη φθορίζουσα ουσία
(δ) από τους ατμούς υδραργύρου
Ποια από τις παραπάνω προτάσεις είναι σωστή;

Απάντηση: Η γ είναι η σωστή

6. Ποιος είναι ο ρόλος του ιωδίου στους λαμπτήρες αλογόνου; Να γίνει πλήρης περιγραφή της δράσης του.

Απάντηση: Βλ. σελίδες 103, 104

7. Να περιγραφεί ο τρόπος με τον οποίο εκπέμπεται ορατό φως από το λαμπτήρα φθορισμού.

Απάντηση: Βλ. σελίδες 104, 105

8. Σε πολλά κέντρα διασκέδασης χρησιμοποιούν λαμπτήρες όμοιους με τους λαμπτήρες φθορισμού αλλά χωρίς φθορίζουσα επίστρωση. Όταν οι λαμπτήρες αυτοί είναι αναμμένοι, τότε τα δόντια μας και κάποια ρούχα μας (ειδικά τα λευκά) φωτοβολούν έντονα. Συζητήστε αυτό το φαινόμενο στην τάξη.

Υπόδειξη: Οι λαμπτήρες εκπέμπουν υπεριώδη ακτινοβολία. Η ακτινοβολία αυτή διεγείρει διάφορες φθορίζουσες ουσίες που υπάρχουν στα ρούχα και στα δόντια μας. Κατά την αποδιέγερσή τους τα άτομα των ουσιών αυτών επανέρχονται στη θεμελιώδη κατάσταση με ενδιάμεσα ενεργειακά άλματα. Έτσι το υπεριώδες φως επανεκπέμπεται από τις ουσίες υπό μορφή ορατού φωτός.

9. Τι είναι οι οπτικές ίνες και τι μπορούμε να πετύχουμε με αυτές;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 106

10. Από ποια μέρη αποτελείται μία οπτική ίνα και ποιος είναι ο ρόλος καθενός;

Απάντηση: Βλ. σελίδες 106, 107

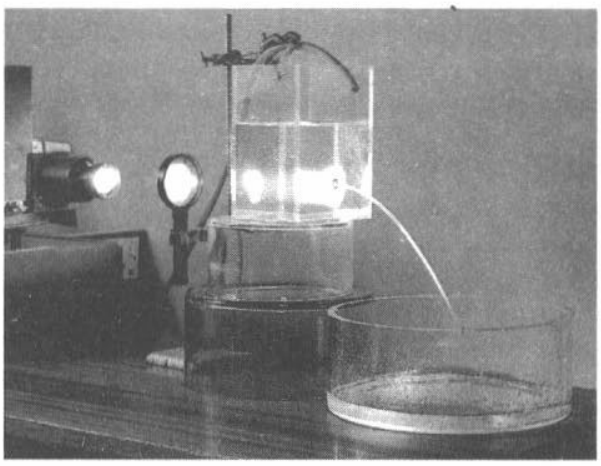
11. Πού οφείλεται η εξασθένηση του φωτός κατά την πορεία του μέσα σε μία οπτική ίνα;

Απάντηση: Βλ. σελίδα 107

12. Να αναφέρετε πέντε τουλάχιστον λόγους για τους οποίους οι οπτικές ίνες αντικατέστησαν τα καλώδια χαλκού στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών.

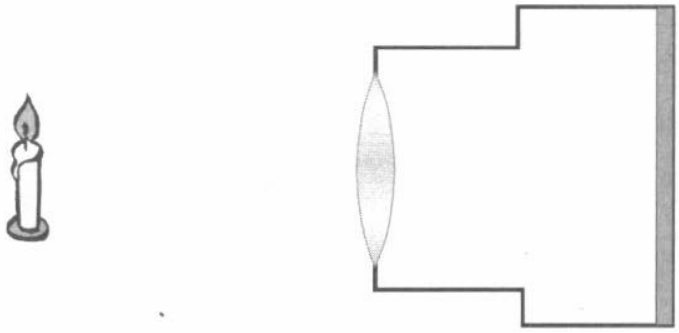
Απάντηση: Βλ. σελίδες 108, 109

13. Στην παρακάτω εικόνα να εξηγήσετε γιατί το φως ακολουθεί την πορεία της φλέβας του νερού.

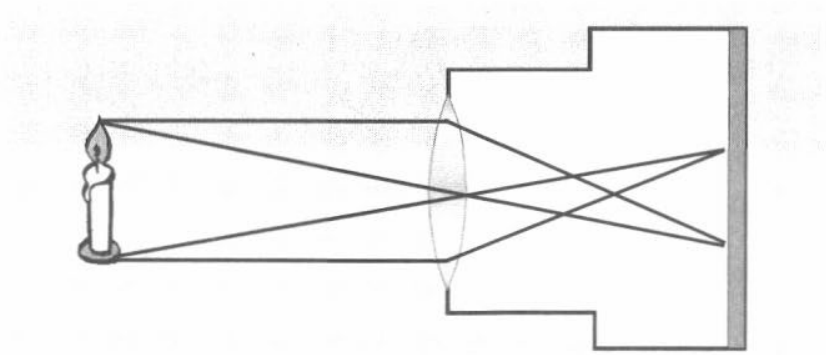


Απάντηση: Η φλέβα του νερού παίζει το ρόλο του πυρήνα οπτικής ίνας με μανδύα τον αέρα. Έτσι το φως με συνεχείς ανακλάσεις στη διαχωριστική επιφάνεια νερού - αέρα ακολουθεί την πορεία της φλέβας.

14. Να σχεδιάσετε την πορεία των ακτίνων και την αποτύπωση του ειδώλου στο φιλμ της φωτογραφικής μηχανής του σχήματος.



Απάντηση:



15. Φωτοβολταϊκά στοιχεία ή φωτοστοιχεία είναι:
(α) διατάξεις που μετατρέπουν ένα μέρος της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική
(β) διατάξεις που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε φωτεινή
(γ) διατάξεις που ενισχύουν το φως
(δ) διατάξεις που μετατρέπουν τη θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική
Ποια από τις παραπάνω προτάσεις είναι σωστή;

Απάντηση: Η α είναι η σωστή.

16. Σχεδιάστε ένα φωτοστοιχείο μετάλλου - Se. Περιγράψτε τον τρόπο ανάπτυξης τάσης στο φωτοστοιχείο αυτό.

Απάντηση: Βλ. σελίδα 116.

17. Η αναπτυσσόμενη τάση στα άκρα ενός φωτοστοιχείου είναι:
(α) τουλάχιστον 10V
(β) όποια επιθυμούμε (γίνεται κατάλληλη ρύθμιση)
(γ) της τάξης των 0,5V
(δ) σίγουρα 1,5V, όπως και των ηλεκτρικών μπαταριών
Ποια από τις παραπάνω προτάσεις είναι σωστή;

Απάντηση: Η γ είναι η σωστή.

18. Με τον όρο φωτόρευμα εννοούμε:
(α) τη ροή φωτός
(β) το ηλιακό φως
(γ) το ρεύμα που διαρρέει ένα κύκλωμα που τροφοδοτείται από φωτοστοιχείο ή φωτοβολταϊκή γεννήτρια
(δ) το φως που εκπέμπεται από σώματα, όταν αυτά διαρρέονται από ρεύματα
Ποια από τις παραπάνω προτάσεις είναι σωστή;

Απάντηση: Η γ είναι η σωστή.

19. Το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει ένα ηλεκτρικό κύκλωμα τροφοδοτούμενο από φωτοβολταϊκή γεννήτρια:
(α) είναι πάντα σταθερό, ανεξάρτητο από την ένταση του φωτός που πέφτει στη φωτοβολταϊκή γεννήτρια
(β) εξαρτάται από το αν το φως προέρχεται από τον Ήλιο ή άλλη πηγή και όχι από την έντασή του
(γ) αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την ένταση του φωτός που πέφτει στη φωτοβολταϊκή γεννήτρια
(δ) είναι ανάλογο της τρίτης δύναμης της έντασης του φωτός που πέφτει στη φωτοβολταϊκή γεννήτρια

Ποια από τις παραπάνω προτάσεις είναι σωστή;

Απάντηση: Η γ είναι η σωστή.

20. Περιγράψτε το μελλοντικό φανταστικό σενάριο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μόνο από τον Ήλιο.

Απάντηση: Βλ. σελίδα 117.

21. Με μια διάταξη laser συμβαίνει:
(α) παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος
(β) παραγωγή φωτός
(γ) ενίσχυση φωτός
(δ) αλλαγή της συχνότητας μιας ακτινοβολίας
Σημειώστε για κάθε πρόταση ένα Σ ή Λ, αν είναι σωστή ή λάθος αντίστοιχα.

Απάντηση: α - Λ, β - Λ, γ - Σ, δ - Σ

22. Περιγράψτε τον τρόπο εκπομπής φωτός με εξαναγκασμένη αποδιέγερση.

Απάντηση: Βλ. σελίδα 118.

23. Να αναφέρετε τα τμήματα μιας διάταξης laser.

Απάντηση: Βλ. σελίδα 119.

24. Πότε μια εκπομπή ακτινοβολίας χαρακτηρίζεται ως αυθόρμητη και πότε ως εξαναγκασμένη; Να αναφέρετε μια πηγή ακτινοβολίας για κάθε περίπτωση.

Απάντηση: Βλ. σελίδες 118, 119, 120.

25. Εξηγήστε τον τρόπο λειτουργίας της διάταξης laser ρουβιδίου.

Απάντηση: Σελίδα 119, 120

26. Αντιστοιχίστε τα παρακάτω:

Λαμπτήρας	Μετατροπέας χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική
Laser	Μετατροπέας ηλεκτρικής ενέργειας σε φως
Φωτοστοιχείο	Μετατροπέας φωτεινής ενέργειας σε ηλεκτρική
	Ενισχυτής φωτός

Απάντηση:

Λαμπτήρας - Μετατροπέας ηλεκτρικής ενέργειας σε φως

Laser - Ενισχυτής φωτός

Φωτοστοιχείο - Μετατροπέας φωτεινής ενέργειας σε ηλεκτρική